WYKŁADY POPULARNO-NAUKOWE
O TEORJI WZGLĘDNOŚCI

CZESŁAW BIAŁOBRZESKI
PROFESOR UNIWERSYTETU WARSZAWSKIEGO

WYKŁADY POPULARNO-NAUKOWE

O TEORJI WZGLĘDNOŚCI

Z 12 RYSUNKAMI W TEKŚCIE

1 9 2 3

TRZASKA, EVERT I MICHALSKI
WARSZAWA, HOTEL EUROPEJSKI

DRUK. ART. K. KOPYTOWSKI i S-KA
WARSZAWA, N-ŚWIAT 47. TEL. 35-80.

BIBLIOGRAFJA.

W języku polskim oryginalnie napisane:

1) *A. Witkowski*—„O zasadzie względności" (Rocznik Akademji Umiejętności w Krakowie, rok 1908 — 1909): szkic bardzo dostępny specjalnej teorji względności.
2) *Cz. Białobrzeski*—„Zasada względności i niektóre jej zastosowania" (Wektor, r. 1911, str. 1 — 19): wykład popularny specjalnej teorji nieco trudniejszy od poprzedniego.
3) *St. Loria* — Względność i Grawitacja. Teorja A. Einsteina. — Lwów, Altenberg. 1921: wykład obejmujący specjalną i ogólną teorję, o charakterze popularnym.
4) *M. Huber* — „Czas, przestrzeń i kosmos w świetle Einsteinowskiej teorji względności" (Kosmos, r. 1921): rozważania odnoszące się do znaczenia podstawowych pojęć teorji.
5) *St. Zaremba*—„Teorja względności wobec faktów stwierdzonych doświadczeniem i spostrzeżeniem" (Dodatek do Rocznika Polskiego Towarzystwa Matematycznego, r. 1922): samodzielne i głębokie badania krytyczne, ujęte w formę ściśle naukową.

To samo w języku francuskim pod tytułem: „La théorie de la Relativité et les faits observés" (Journal de Mathématiques pures et appliquées, 1922, fascicule 2).

W tłumaczeniu na język polski wyszły:

6) *A. Einstein*—„O szczególnej i ogólnej teorji względności", 2 wyd., 1922 (tłumaczenie prof. M. Hubera).
7) *A. Einstein*—„Eter a teorja względności", 1922.
8) „ „Geometrja i doświadczenie", 1922.
9) *F. Beer*—„Einsteina teorja względności", 1922.

Z literatury w językach obcych podaję niektóre dzieła, pomijając przetłumaczone na język polski.

Dzieła, zawierające wykład matematyczny teorji:

10) *A. Einstein* — „Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie", Leipzig, 1916 (abgedruckt aus Annalen der Physik, 49, p. 769, 1916).
11) *Lorentz-Einstein-Minkowski* — „Das Relativitätsprincip. Eine Sammlung von Abhandlungen", 4-te Auflage, 1922 Teubner.
12) *A. Kopff* —Grundzüge der Einsteinschen Relativitätstheorie, Leipzig, 1921: najłatwiejszy z wykładów matematycznych teorji względności.
13) *M. v. Laue*—„Das Relativitätsprincip", I Bd. 4 Aufl. 1921, II Bd 1922. Vieweg.
14) *H. Weyl*—„Raum, Zeit, Materie", 4 Aufl. Berlin, 1921.
15) *W. Pauli*—„Relativitatstheorie", Teubner. 1921.

Dzieła popularne:

16) *M. Schlick*—„Raum und Zeit in der gegenwärtigen Physik", 3 Aufl., Berlin, 1921.
17) *E. Freundlich*—„Die Grundlagen der Einsteinschen Gravitationstheorie", 3 Aufl., 1920.
18) *M. Born*—„Die Relativitätstheorie Einsteins und ihre physikalischen Grundlagen", Berlin, 1920.
19) *A. S. Eddington*—„Space, Time and Gravitation", Cambridge, 1920. Tłumaczenie francuskie uzupełnione dodatkiem matematycznym: „Espace, Temps et Gravitation", Paris, 1921.
20) *L. Fabre*—„Les théories d'Einsten", Paris, 1921.

Dzieła treści filozoficznej:

21) *E. Cassirer*—„Zur Einsteinschen Relativitatstheorie", Berlin, 1921.
22) *J. Petzold* —„Die Stellung der Relativitätstheorie in der geistigen Entwickelung der Menschheit". Dresden, 1921.
23) *A. Whitehead*—„An Enquiry concerning the Principles of Natural Knowlegde", Cambridge, 1919: dzieło obejmujące oprócz teorji względności szeroki zakres zagadnień filozoficznych, związanych ze spółczesnym rozwojem fizyki.

PRZEDMOWA.

Książka niniejsza powstała z odczytów, stanowiących część cyklu, urządzonego w lutym i marcu r. 1922 staraniem Warszawskiego Oddziału Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Duża frekwencja była dowodem niesłabnącego zainteresowania, jakie teorja Einsteina budzi w szerokich kołach myślącej publiczności. Moim zamiarem przy układaniu tych odczytów było przedstawienie idej kierowniczych teorji względności w sposób możliwie przystępny, nie posługując się analizą matematyczną.

Jestem zdania, że wykład tego rodzaju może przydać się także fizykom i matematykom na początku ich studjów, ponieważ śród rozległych i trudnych dedukcyj matematycznych, jakich wymaga opracowanie ściśle naukowe teorji względności, nie zawsze łatwo wyczytać fizyczne idee przewodnie.

Czytelnik, znający literaturę przedmiotu, spostrzeże w ugrupowaniu i ujęciu materjału pewne różnice w porównaniu z innemi dziełami popularnemi. Ponadto książkę tę wyróżnia rozdział końcowy, gdzie autor wskazał trudności związane z poglądami Einsteina, co sprawia, że pozycja te-

orji względności w całokształcie wiedzy fizycznej nie jest jeszcze ostatecznie ustalona.

Bibliografja dodana na końcu nie wyczerpuje rozległej literatury przedmiotu i ma tylko na celu ułatwienie głębszych studjów nad teorją.

Autor.

WSTĘP.

Fizyka spółczesna może wykazać szereg odkryć doświadczalnych i pomysłów teoretycznych, posiadających niezwykłą doniosłosć dla zrozumienia przyrody. Żadna jednak nowość naukowa nie wzbudziła tak powszechnego zainteresowania, jak teorja względności Einsteina.

Zarazem nie było chyba dotychczas teorji tak trudnej do spopularyzowania. W celu przezwyciężenia trudności można powołać do pomocy matematykę, potężne narzędzie ścisłej myśli. Tą drogą iść nie możemy, ponieważ byłyby potrzebne zbyt rozległe wiadomości matematyczne i elementarna matematyka niewieleby nam dopomogła.

Jeżeli usuniemy matematykę, istnieje, jak mniemam, możność zrozumienia idei, stanowiących rdzeń teorji względności; ale wówczas napotykamy trudności logiczne, wymagające przyzwyczajenia do abstrakcyjnego myślenia. Pójdziemy w tym właśnie kierunku, albowiem innego wyboru niema.

Na wstępie wypada zaznaczyć, że znaczenie filozoficzne teorji względności, jeśli się zdoła utrzymać, ocenią w zupeł-

ności tylko przyszłe pokolenia. Wszak przewrót w światopoglądzie, jaki spowodowały prace Kopernika, Galileusza i Newtona, stał się punktem wyjścia nowej fillozofji. Znana szkoła badaczów filozofji Kanta utrzymuje, iż ten znakomity myśliciel nie miał innego celu, jak filozoficzne opracowanie Newtonowskiego poglądu na przyrodę. Teorja względności stanowi szczytowy punkt procesu rewizji, której ulegają od początku XX-go stulecia podstawy przyrodoznawstwa, przekazane z czasów, gdy żyli trzej wyżej wymienieni wielcy mężowie. Znajdujemy się niewątpliwie na przełomie dwuch epok w historji myśli ludzkiej i czas najbliższy pokaże, czy zdołamy pokonać trudności, których nie usunęła i teorja względności.

---

§ 1. Pojęcia przestrzeni i czasu oraz ich rola w fizyce.

Teorja względności sięga do najgłębszych pojęć nauki o przyrodzie, poddając krytyce wyobrażenia przestrzeni i czasu, nierozerwalnie związane z ujęciem zjawisk świata zewnętrznego. Zastanówmy się nieco nad temi wyobrażeniami. Każden przyzna, iż są one nieuchwytne i pozbawione treści konkretnej. Usuńmy w myśli wszystkie przedmioty znajdujące się we wszechświecie. Pogląd najpospolitszy utrzymuje, że pozostanie wtenczas przestrzeń pusta, coś jakby naczynie, w którem wszystko się mieściło. Ale to naczynie nie posiada ścian i nikt nie potrafi wytłumaczyć, czem się ono różni od nicości. Jest to „istniejące nic“, jak się wyraził Kant. Tak samo w nicość rozpływa się czas, w którym niema żadnych zdarzeń, nic się nie odbywa. Wobec tego Kant przyszedł do wniosku, że przestrzeń i czas są to formy umysłowe, w których zdolność poznawcza ujmuje zjawiska przyrody.

Ale zagadnienia filozoficzne nie należą bezpośrednio do zakresu naszych rozważań. Nas tu obchodzi przedewszystkiem pytanie, jaką rolę odgrywają przestrzeń i czas w przyrodoznawstwie i specjalnie we fizyce. Olbrzymią rolę tych wyobrażeń stwierdza fakt, że fizyka usiłuje sprowadzić zjawiska zewnętrzne do ruchów ciał lub cząsteczek, z których

ciała są utworzone, ruch zaś jest to proces zmiany położenia w przestrzeni z biegiem czasu.

Postarajmy się teraz dać odpowiedź na pytanie, jaka treść dokładna zawiera się w pojęciu, wyrażonem słowami „położenie w przestrzeni“. Czy możemy mówić o bezwzględnem miejscu jakiegokolwiek ciała w przestrzeni? Przez długie wieki ludzie kulturalni przyjmowali istnienie takich miejsc czy położeń. Dopóki nie utrwaliło się przekonanie, że ziemia ma postać zbliżoną do kuli, uważano, iż „wyżej“ i „niżej“ są to kierunki bezwzględne. Ciała bardzo lekkie wznoszą się, jak mniemano, dlatego, że dążą ku swemu naturalnemu położeniu w górnych sferach, ciała ciężkie spadają na ziemię, ponieważ mają swe naturalne położenie na dole.

Opierając się na tem zakorzenionem pojęciu góry i dołu ludzie średniowieczni poczytywali za niedorzeczność hipotezę kulistego kształtu ziemi, ta hipoteza bowiem prowadzi do wniosku, że na przeciwległym końcu średnicy ziemskiej, przeprowadzonej przez punkt, który my zajmujemy, znajdują się ludzie, tak zwani antipody, chodzący względem nas do góry nogami. Z punktu widzenia bezwzględnych „góry“ i „dołu“ wydawało się to niemożliwem. Obecnie oswoiliśmy się z tem, że antipody istnieją i pojęcia „wyżej“ i „niżej“ są względne, mianowicie odnoszą się do środka ziemi. Przedmioty bliższe środka ziemi są na dole względem przedmiotów dalszych, które są u góry. Wszystkie wątpliwości znikły od czasu, gdy wyprawa Magellana odbyła pierwszą podróż naokoło świata.

Rozważania dotychczasowe mogły zachwiać przeświadczenie, że wyobrażeniom przestrzeni i czasu przysługuje jakaś treść rzeczowa w świecie zewnętrznym. Ażeby zdobyć jasny sąd w tych trudnych zagadnieniach, spróbujmy ustalić, jak fizyk rozumie pojęcie rzeczywistości. Oczywiście, nie mam zamiaru zapuszczać się w dyskusję nad tym tematem

zawiłym. Wystarczy dla naszego celu znaleźć nić przewodnią możliwie prostą i zgodną z tą metodą, jaką fizyka zastosowuje przy badaniu przyrody. Powołamy się najpierw na pogląd Leibniza, wypowiedziany w jego walce przeciwko pojęciom bezwzględnych przestrzeni i czasu, wprowadzonym przez Newtona. Leibniz oparł się na zasadzie, głoszącej, że wszystko, co nie może w żaden sposób stać się przedmiotem doświadczenia, w znaczeniu fizycznem nie istnieje: „Quand il n'y a point de changement observable, il n'y a pas de changement du tout". Warto przytoczyć przykład, który tę myśl zilustruje.

W słynnem dziele Newtona „Philosophiae naturalis principia mathematica" znajdujemy następujące określenie czasu: „bezwzględny, rzeczywisty i matematyczny czas upływa sam w sobie, zgodnie ze swą naturą jednostajnie i niezależnie od jakiegokolwiek przedmiotu. Można mu nadać miano trwania". Czy czas bezwzględny jest rzeczywistością, która da się skonstatować? Załóżmy, iż wszystkie zmiany w przyrodzie nagle zaczęły się odbywać z szybkością dwa razy większą, aniżeli obecnie: doba, rok stały się dwa razy krótsze i zarazem zmiany w naszych organizmach i bieg działalności psychicznej podwoiły swą prędkość. Czy ta zmiana tempa w biegu zjawisk wszechświata może być jakimkolwiek sposobem spostrzeżona? Chwila zastanowienia wystarczy, aby zaprzeczyć tej możliwości. Czy jest więc bezwzględne trwanie? W myśl zasady Leibniza to pojęcie nie posiada rzeczywistości fizycznej.

Rozumowanie powyższe nasuwa, być może, pewne zastrzeżenia z punktu widzenia psychologicznego: przecie Bergson, opierając się na analizie stanów psychicznych, mówi o „durée vraie", trwaniu rzeczywistem, którego każda chwila jest tworzeniem.

W granicach metody przyrodniczej trudno, bądź co

bądź, wątpić o słuszności Leibnizowskiej zasady. Można ją jeszcze zacieśnić i sprowadzić do formuły prostszej. Planck, znakomity teoretyk niemiecki, powiedział: „dla fizyka rzeczywistem jest wszystko, co daje się wymierzyć“. Te słowa są streszczeniem istoty metody fizycznej. Badanie świata zjawisk fizyk sprowadza do pomiarów rozmaitych wielkości i z rezultatów pomiarów wyciąga wnioski w postaci praw, z których buduje w dalszym ciągu teorje, ujmujące całokształt grup zjawisk. To, co nie jest mierzalne, leży poza zakresem dociekań fizyki.

Biorąc za punkt wyjścia formułę Plancka, zdajmy sobie sprawę z tego, jak i co jest przedmiotem pomiarów w tem, co my nazywamy przestrzenią i czasem. Każde zjawisko odbywa się w oznaczonem miejscu. Jak już przekonaliśmy się, miejsc bezwzględnych w przestrzeni niema. Możemy mówić tylko o położeniu jednych przedmiotów względem drugich, to znaczy mierzalne są tylko stosunki przestrzenne.

Do określenia położeń ludzkość od wieków posługuje się ciałami w przybliżeniu sztywnemi, czyli takiemi, które, jak sądzimy, są niezmienne. Naprz. sztaba stalowa, jeśli jej nie poddajemy oddziaływaniom specjalnym, w znacznej mierze odpowiada pojęciu niezmienności. Z pomocą takiej sztaby wymierzamy odległości pomiędzy oznaczonymi punktami. Metr, zasadnicza jednostka długości, jest zrealizowany w postaci sztaby, wyrobionej ze stopu platyny i irydu i przechowywanej w Biurze międzynarodowem miar i wag w Sèvres około Paryża.

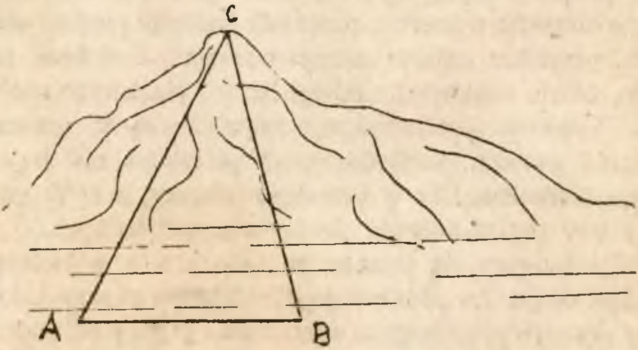
Ażeby sprowadzić pomiary położeń do jednolitości powinniśmy obrać jakieś ciało lub układ ciał i od nich odmierzać odległości. Ludzkość do oznaczenia położeń we wszechświecie ma dane przez naturę ciało, swoją siedzibę— glob ziemski. Jeżeli powiadam, iż jakiś fakt zaszedł w Warszawie na Placu Saskim, miejsce jest dostatecznie oznaczone.

Dla celów naukowych taki sposób nie jest przydatny. W nauce ścisłej posługujemy się układami spółrzędnych. Najpospolitszym jest układ spółrzędnych prostokątnych Kartezjusza. Fizycznie rzecz biorąc, jest to układ trzech płaszczyzn, ograniczających ciała stałe i ustawionych do siebie prostopadle, naprz. płaszczyzny podłogi i dwu ścian sali odczytowej, przecinających się pod kątem prostym. Łatwo sobie uprzytomnić, że położenie każdego danego punktu w tej sali będzie wyznaczone, jeśli wymierzę długości prostopadłych, spuszczonych z danego punktu na trzy wspomniane płaszczyzny. Jeżeli je przedłużymy poza granice sali w nieskończoność, trzy prostopadłe wyznaczą położenie każdego punktu wszechświata, przyczem należy jeszcze wprowadzić dobrze znaną umowę co do znaku tych odległości od płaszczyzn spółrzędnych. Ponieważ potrzebne są trzy wielkości do oznaczenia położenia punktu, powiadamy, iż przestrzeń ma trzy wymiary. Nadmienię, że w przecięciu płaszczyzn spółrzędnych mamy trzy prostopadłe do siebie osie spółrzędnych.

Zastanówmy się jeszcze, w jaki sposób wymierza się odległość od punktu oddalonego. Chodzi nam naprzykład o to, ażeby wymierzyć odległość wierzchołka *C* góry od punktu *A*, w którym znajduje się obserwator (rys. 1). W tym celu za pomocą sztaby metrowej wymierzamy na możliwie równym terenie tak zwaną podstawę *AB*, następnie, posługując się teodolitem, zaopatrzonym w podziałkę kątową i lunetę, którą możemy skierować na punkt *C*, znajdujemy kąty *CAB* i *CBA*, co umożliwia obliczenie odległości *AC* i *BC*. Milcząco przy tem zakładamy, że promień światła, wybiegający z punktu *C* i trafiający do lunety, przebiega drogę prostolinjową, czyli, że trójkąt *ACB* jest prostolinjowy. Zupełnie taka sama w zasadzie metoda służy do wyznaczania odległości, jakie oddzielają od nas ciała niebieskie.

Jednakowoż sztaba sztywna i promień światła nie wy-

starczają do określenia stosunków przestrzennych. Nieodzowną jest znajomość twierdzeń geometrji, jak to wykazuje świeżo rozpatrzony przykład. Nadmienię już teraz, iż matematyk jest w posiadaniu rozmaitych geometryj, z których każda w zupełności czyni zadość wymaganiom logicznym. Musimy obrać którąkolwiek z nich. Od najdawniejszych czasów ludzkość mniej lub więcej świadomie posługuje się geometrją euklidesową, której wszyscy uczymy się w szkole. Nie jest tutaj naszem zadaniem omawianie podstaw geometrji.



Rys. 1.

Zaznaczę tylko, że geometrja euklidesowa opiera się na pojęciach określonych, jak naprz. linja prosta, płaszczyzna oraz pewnikach, z których drogą dedukcji wyprowadzają się twierdzenia geometryczne. Naprz. definicja linji prostej opiewa: linja prosta jest to utwór geometryczny, określony jednoznacznie przez dwa punkty; z pośród linij, łączących jakiekolwiek dwa punkty najkrótszym jest odcinek prostej. Ta definicja domaga się uzupełnienia, albowiem w geometrjach nieeuklidesowych jej odpowiadają linje krzywe, zwane geodetycznemi. Nie możemy tu zapuszczać się w dyskusję nad temi kwe-

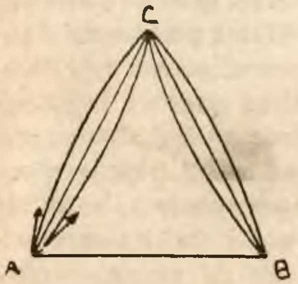
stjami. Prócz tego pojęcia punktu i odcinka muszą być albo ustalone albo przyjęte jako intuicyjnie zrozumiałe.

Wymienię jedno z twierdzeń charakterystycznych dla geometrji euklidesowej: suma kątów w trójkącie prostolinjowym równa się dwu kątom prostym.

Powstaje samo przez się nasuwające się pytanie: jakiej geometrji odpowiadają stosunki przestrzenne we wszechświecie? Czy pomiary tych stosunków przy pomocy sztaby sztywnej i promieni świetlnych, chwytanych w lunetę, mogą rozstrzygnąć, jaka geometrja jest prawdziwa, euklidesowa czy nieeuklidesowa? Pytanie tak sformułowane jest nadzwyczaj delikatne: wielu ludzi wybitnych uważało je za niedorzeczne. Jednak wielki matematyk niemiecki Gauss przedsięwziął pomiar sumy kątów trójkąta, którego wierzchołkami były oznaczone punkty na górach Brocken, Hohe Hagen i Inselberg, a to w celu przekonania się, czy ta suma wynosi dwa proste; w geometrjach nieeuklidesowych suma kątów trójkąta, utworzonego z linij najkrótszych, czyli geodetycznych, różni się od dwu kątów prostych. Tym sposobem chciał Gauss rozstrzygnąć, czy w granicach rozmiarów kuli ziemskiej obowiązuje geometrja euklidesowa. Do pomiaru oczywiście była użyta luneta; odstępstwa od geometrji euklidesowej nie zauważono. Jeszcze wcześniej jeden z twórców geometrji nieeuklidesowej, matematyk rosyjski Łobaczewskij, zaproponował zbadanie w tym celu trójkąta o wiele większego, mającego za podstawę średnicę drogi ziemskiej dokoła słońca i jako wierzchołek przeciwległy — świetną gwiazdę Syrjusz.

Podniesiono zarzut, szczególniej ze strony filozofów, że tego rodzaju pomiary mijają się ze swym celem i nigdy nie mogą dowieść, jaka geometrja jest prawdziwa. Załóżmy w istocie, iż, po wymierzeniu z niebywałą dokładnością kątów A i B (rys. 1), udaliśmy się na wierzchołek C i wymierzyliśmy kąt ACB, przyczem okazało się, iż suma kątów

trójkąta *ABC* jest mniejsza lub większa, aniżeli dwa kąty proste. Czy ten wynik prowadzi niechybnie do wniosku, że geometrja euklidesowa nie odpowiada stosunkom przestrzennym wszechświata? Bynajmniej: do wytłumaczenia uzyskanego rezultatu wystarczy przyjąć, iż promienie światła biegnące od *C* do *A* i *B* nie zakreślają linji prostej lecz krzywą, innemi słowy, że boki *AC* i *BC* trójkąta są lekko zakrzywione. Wtenczas geometrja euklidesowa pouczy, iż suma kątów trójkąta różni się od dwu prostych (rys. 2): jest większą, gdy trójkąt jest wypukły, mniejszą, gdy jest on wklęsły. Podobną interpretację możemy zawsze wynaleźć we wszystkich przypadkach rzekomo niezgodnych z geometrją euklidesową. To rozumowanie, szczególnie uwydatnione przez H. Poincaré'go w jego znakomitej książce „La Science et l'Hypothèse" jest bezwarunkowo nieodparte. Geometrja euklidesowa jest systemem twierdzeń dedukcyjnych, opartym na przesłankach, być może nasuniętych przez doświadczenie, lecz od niego uniezależnionych. Doświadczenie nie jest w stanie podobnego systemu obalić. To samo stosuje się zresztą i do każdej geometrji nieeuklidesowej.



Rys. 2.

Takie stanowisko zajmuje matematyk; ale fizyk nie jest matematykiem lecz badaczem przyrody i uważa, iż jest uprawniony rozumować inaczej. I on zgodzi się na to, że odstępstwo sumy kątów trójkąta od dwu prostych może być skutkiem krzywolinjowej drogi promieni światła. Jednakże na tem przypuszczeniu nie wolno mu poprzestać: jego zadaniem teraz będzie wynalezienie przyczyn, powodujących za-

krzywienie promieni. Stać się może, iż badania prowadzone w tym celu, nie zostaną uwieńczone powodzeniem, to znaczy, że fizyk nie zdoła śród znanych mu przyczyn odnaleźć takiej, która mogłaby wywrzeć wpływ, jakiego wymaga rezultat pomiarów. Wtedy swoim krytykom da on następującą odpowiedź: „Słuszności waszych wniosków nie zaprzeczam, ale nie rozporządzam doskonalszemi instrumentami mierniczemi, aniżeli promień światła i sztaba z materjału, który najlepiej odpowiada pojęciu sztywności. Zarazem, nie mogąc wytłumaczyć zakrzywienia promienia, muszę skonstatować, iż zakreśla on linję krzywą, chociaż żadne wpływy nań nie działają. Ten fakt jest niezrozumiały dla mnie, jeżeli w przestrzeni obowiązuje geometrja euklidesowa: jako fizyk, nie przystanę na to, że promień światła, przebiegający w próżni zdala od jakichkolwiek oddziaływań, może zakreślać linję, która nie jest najkrótszą". Otóż w przestrzeniach nieeuklidesowych najkrótszemi linjami są określone krzywe. „Wobec tego", powiada dalej fizyk, „znajduję dla siebie wyjście w tem, iż śród rozmaitych geometryj nieeuklidesowych, jakiemi rozporządza matematyka, wybieram taką, w której linjami najkrótszemi byłyby drogi promieni świetlnych, wskazane przez doświadczenie. W każdym razie wolno mi spróbować, czy ta hipoteza nie doprowadzi do uzgodnienia wszystkich pojęć o stosunkach w świecie doświadczenia." Jeżeli uda się fizykowi wykazać, że w całym zasobie wiedzy fizycznej niema sprzeczności z tą hipotezą, niepodobna jego stanowiska obalić. Tą drogą poszedł Einstein w swej teorji ciążenia powszechnego.

Zapewne fizykowi nie przyjdzie łatwo rozstać się z geometrją euklidesową. Predylekcja, jaką się ta geometrja cieszy, jest dobrze uzasadniona tem, iż nigdy dotychczas nie zawodziła, jako narzędzie ideowe w badaniu przyrody. Nic dziwnego, że do niedawna uważano ją za jedynie możliwą.

Tutaj przerwę dyskusję nad geometrją w stosunku do fizyki, aby raz jeszcze powrócić do tego tematu w § 8.

Do opisu zjawisk przyrody nie dość wskazać ich miejsce; każde zjawisko odbywa się w czasie, pytaniu „gdzie" zawsze towarzyszy pytanie „kiedy". Objaw elementarny, tak zwany punkt zjawiskowy jest określony przez cztery wielkości: trzy spółrzędne, wyznaczające jego położenie w przestrzeni i czas, liczony od obranego momentu początkowego. Możemy już stąd wywnioskować, iż świat zjawisk jest czterowymiarowy, ale o tem mowa będzie później.

Do mierzenia czasu jest potrzebny przyrząd, który nazywamy zegarem. Dokładne ustanowienie miary czasu nie jest rzeczą łatwą. Przyjmujemy wraz z wieloma mistrzami mechaniki teoretycznej, iż za miarę czasu może służyć każdy objaw w przyrodzie, który powtarza się w identycznych warunkach. Trudność zasadnicza polega na stwierdzeniu owej identyczności warunków. Naprz. sądzimy, że ciała wszechświata nie wywierają wpływu dostrzegalnego na czas obrotu ziemi około osi. Wobec tego przyjęto średnią dobę słoneczną za jednostkę czasu. Fizyczną jednostką czasu może być okres drgania, odpowiadający ostrej linji widmowej, wydawanej przez oznaczony pierwiastek, przyczem warunki świecenia muszą być ustalone. Wydaje się nam, że niezmienność okresu drgań atomowych jest lepiej zabezpieczona, aniżeli niezmienność doby ziemskiej. Bądź co bądź, możemy nasze zwykłe zegary uregulować dokładnie według przyjętej jednostki czasu za pomocą metod astronomicznych.

§ 2. Zasada względności w mechanice klasycznej.

Pojęcia przestrzeni i czasu łączą się w pojęciu ruchu, zjawiska zasadniczego w mechanice i fizyce. Przez ruch

pospolicie rozumiemy proces zmiany położenia ciał z biegiem czasu. Z tego, co uprzednio mówiliśmy o mierzalności położeń i czasu, wynika, że ruch bezwzględny nie istnieje, przynajmniej w znaczeniu fizycznem. Tu się przyda uwaga, być może, banalna, ale usprawiedliwiona skłonnością do zapominania o tem, że fizyka abstrahuje od przeżyć wewnętrznych: ciała przyrody, rozpatrywane z punktu widzenia fizyki, nie czują i nie pamiętają. Mówiąc zatem o ruchu, stwierdzić możemy tylko ruchy jednych ciał względem drugich. Niema też i drogi samej w sobie, niezależnej od ciał otaczających. Jeżeli podróżny jadący w pociągu ruchem prostolinjowym i jednostajnym upuści z okna na tor jakikolwiek ciężki przedmiot, wyda mu się, iż ów przedmiot spada na ziemię po linji prostej. Człowiek, stojący obok toru, powie, iż droga spadku jest krzywa, że przedmiot upuszczony z okna wagonu zakreśla łuk paraboli, jeżeli opór powietrza gra rolę nieznaczną. Jaka droga jest rzeczywista, prosta czy parabola? Na to pytanie narazie możemy odpowiedzieć tylko tyle, że każdy ruch jest względny: odnośnie do układu spółrzędnych, związanego nieruchomo z ziemią, drogą jest parabola, odnośnie zaś do układu, biorącego udział w ruchu pociągu, drogą tegoż ciała jest prosta. Gdy powiadamy, że ciało porusza się po jakimś torze, zdanie to ma sens naukowy pod warunkiem, jeżeli równocześnie wskażemy, do jakiego układu spółrzędnych odnosimy dany ruch.

Widzieliśmy, że położenie punktów zjawiskowych można wyznaczyć za pomocą układu prostokątnego osi Kartezjusza. Weźmy naprz. trzy płaszczyzny ścian i podłogi tej sali odczytowej, przedłużone nieograniczenie. Czy w ten sposób sprawa wyboru spółrzędnych, odpowiednich do badania zjawisk wszechświata, będzie rozstrzygnięta? Odpowiedź na to pytanie wypadnie przecząca. Trzy płaszczyzny obrane przez nas są związane z ziemią, uczestniczą w jej ruchu obrotowym

dziennym około osi i postępowym rocznym dokoła słońca. Jakikolwiek ruch we wszechświecie zupełnie inaczej się przedstawia względem tych spółrzędnych ziemskich, aniżeli względem podobnych spółrzędnych pomyślanych we środku naszego układu planetarnego, to znaczy we środku słońca. Np. względem ziemi wszystkie gwiazdy niezmiernie odległe zataczają w ciągu doby okręgi kół, których środki leżą na osi ziemskiej i jej przedłużeniu. Dla obserwatora pomyślanego we środku słońca gwiazdy są nieruchome, ściślej mówiąc, ich położenia wzajemne zmieniają się nadzwyczaj powolnie. Który z tych dwu układów spółrzędnych mamy obrać: czy nasz układ ziemski, czy ów układ heliocentryczny, związany ze słońcem? Od czasów Kopernika odpowiedź nie nastręcza wątpliwości. Ów mąż znakomity wykazał, iż zawiłość praw, które rządzą ruchami ciał niebieskich znika, skoro założymy, że ziemia nie jest nieruchoma we środku wszechświata, lecz krąży naokoło słońca wraz z innemi planetami. Z punktu widzenia naszych rozważań dotychczasowych reforma światopoglądu, dokonana przez Kopernika, sprowadza się poprostu do tego, że wszystkie ruchy i zjawiska we wszechświecie powinniśmy odnosić do układu spółrzędnych, umieszczonych we środku słońca, lub nieruchomych względem tego środka, nie zaś do układu związanego z ziemią.

Równocześnie tu się ujawnił motyw epistemologiczny (teorjopoznawczy), który w dziejach nauki ścisłej od Kopernika do Einsteina posiadał znaczenie dominujące. Szukamy takiego opisu i tłumaczenia zjawisk, któryby był jaknajprostszy i zarazem łączył wszystkie pojęcia o przyrodzie w całość harmonijną i logicznie zbudowaną. Dzieło, rozpoczęte przez Kopernika, prowadził dalej Galileusz i zakończył Newton, który ułożył system praw zasadniczych mechaniki, służących zarazem za podstawę fizyki i całego przyrodoznawstwa. Prawa Newtona są prawami ruchu, muszą zatem od-

nosić się, jak wyżej zostało wyjaśnione, do określonego układu spółrzędnych.

Dla naszych celów wystarczy wziąć na uwagę tylko pierwsze prawo Newtona, zwane prawem bezwładności. Ono głosi, że ciało, na które nie działa siła zewnętrzna, trwa w stanie spoczynku albo ruchu jednostajnego prostolinjowego. Treść tego prawa musi być uzupełniona wskazówką, do jakiego układu spółrzędnych mamy je zastosować. Tę wskazówkę konieczną z reguły pomijają podręczniki. Ruch prostolinjowy i jednostajny względem ziemi ma całkiem inny charakter, jeśli odniesiemy go do słońca. Układ spółrzędnych, względem którego ciała pozostawione sobie, t. j. nie ulegające żadnym wpływom, poruszają się jednostajnie i prostolinjowo, nazywa się inercyjnym. Znaczenie inercyjnego układu spółrzędnych jest doniosłe: mechanika Newtona i wszystkie na niej oparte prawa przyrody przybierają postać najprostszą, jeżeli je odniesiemy do tego układu. Czy istnieje układ inercyjny, czy możemy go wskazać? Z wielkiem przybliżeniem takim jest układ spółrzędnych nieruchomy względem gwiazd: początek jego można naprz. umieścić we środku słońca. Wszystkie ruchy we wszechświecie, opisane za pomocą mechaniki Newtonowskiej, mają charakter najprostszy, ogólnie rzecz biorąc, względem tego układu spółrzędnych, któremu często dają nazwę astronomicznego.

Teraz zwróćmy uwagę na fakt interesujący i ważny. Prawa Newtona nie określają układu inercyjnego w sposób jednoznaczny: istnieje nieskończenie wiele układów inercyjnych. Charakterystyczną cechą układu inercyjnego jest to; że ciało pozostawione sobie porusza się względem niego prostolinjowo i jednostajnie. Za takie ciała w przybliżeniu możemy uważać gwiazdy i nasze słońce. Załóżmy, iż znaleźliśmy układ tego rodzaju, naprz. wyżej wskazany układ astronomiczny.

Otóż jakibądź inny układ spółrzędnych, poruszający się względem astronomicznego prostolinjowo i jednostajnie, też jest układem inercyjnym. W rzeczy samej, jeżeli ciało porusza się prostolinjowo i jednostajnie względem pierwszego układu, ruch tego ciała jest prostolinjowy i jednostajny względem drugiego, tylko prędkość ruchu jest zmieniona. Naprz. ruch lecącego ptaka przedstawia się inaczej przy obserwowaniu go z okna wagonu, znajdującego się w ruchu, i z toru kolejowego; jeżeli jednak ruchy pociągu i ptaka są prostolinjowe i jednostajne, charakter ruchu ptaka pozostaje ten sam z obu punktów obserwacyjnych.

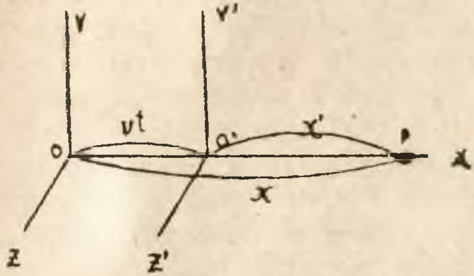
Widzimy, że istnieje nieskończona mnogość układów inercyjnych, względem których prawa przyrody zgodne z mechaniką Newtona, mają postać najprostszą i jednakową. Ta zasada nazywa się zasadą względności mechaniki klasycznej w odróżnieniu od zasady względności Einsteina, z którą niebawem się zapoznamy. Można zasadę klasyczną uzmysłowić przykładem następującym: wyobraźmy obserwatora, który znajduje się w kajucie statku płynącego bez wstrząśnień prostolinjowo i jednostajnie: otóż żadne doświadczenia mechaniczne nie ujawnią mu, iż nie jest w spoczynku, lecz w ruchu.

Lubo mojem zadaniem jest przedstawienie ideowej treści, stanowiącej rdzeń teorji względności, omijając symbolizm matematyczny, muszę jednak pozwolić sobie parę razy na odstępstwo od tej reguły, przyczem będę wybierał sposoby najbardziej elementarne. Wyobraźmy sobie dwa układy spółrzędnych prostokątnych Kartezjusza XYZ i $X'Y'Z'$, mające wspólną oś X. Układ $X'Y'Z'$ porusza się w kierunku osi X z prędkością stałą v względem układu XYZ, który uważamy za nieruchomy. Osie Y' i Z' są równoległe do Y i Z (rys 3). Czas będziemy oznaczali przez t: niech w chwili $t = O$ początki O i O' obu układów zlewają się. Po upływie czasu t początek O' układu ruchomego znajdzie się w odległości

vt od *O*. Zapytujemy, jaką jest odległość od *O'* w tejże chwili *t* punktu *P*, którego odległość od *O* równa się *x*. Te odległości są to zarazem spółrzędne punktu *P* w odniesieniu do obu układów. Oznaczając odległość punktu *P* od *O'* czyli spółrzędną względem układu ruchomego przez *x'*, mamy:

$$x' = x - vt \ (1).$$

Ten wzór daje nam zależność między spółrzędnemi względem dwu układów, z których jeden uważamy za nieruchomy, drugi zaś porusza się wzdłuż osi *x* ruchem jedno-



Rys 3.

stajnym i prostolinjowym z prędkością *v*. Jeżeli układ nieruchomy jest inercyjny, układ ruchomy też jest inercyjny. Wzór napisany wyraża przekształcenie, które od jednego układu inercyjnego prowadzi do drugiego, nazywa się ono na cześć ojca fizyki przekształceniem Galileusza.

Załóżmy teraz, iż punkt *P* porusza się jednostajnie w kierunku tejże osi *X* z prędkością *w* względem układu ruchomego. Jaką będzie jego prędkość odnośnie do układu nieruchomego? Jasną jest rzeczą, iż, skoro punkt *P* oddala się od *O'* z prędkością *w*, *O'* zaś oddala się od *O* z prędkością *v*, prędkość oddalania się *P* od *O* będzie $V = v + w$.

Jeżeli naprz. parostatek płynie po rzece z prędkością stałą v i na nim człowiek idzie w kierunku ruchu statku z prędkością w, to prędkość ruchu człowieka względem brzegów jest $v+w$. Mamy tu prawo składania prędkości według mechaniki klasycznej. Według Einsteina to prawo w rzeczywistości nie zachodzi i powinno być zastąpione przez inne.

§ 3. Stosunek teorji zjawisk elektromagnetycznych do mechaniki klasycznej. Postulat Einsteina.

Zbliżyliśmy się do punktu krytycznego naszych rozważań. Dwieście lat mechanika Newtona święciła tryumfy w tłumaczeniu zjawisk przyrody i panowało powszechne przekonanie, że praw zasadniczych różniących się od praw Newtona i zgodnych z doświadczeniem nie da się pomyśleć. Otóż w latach 80-ch ubiegłego stulecia dwaj uczeni amerykańscy Michelson i Morley wykonali słynne doświadczenie, które dla fizyki teoretycznej wytworzyło trudności niezmierne. Idea doświadczenia należy do Maxwella, jednego z największych uczonych wieku XIX, twórcy elektromagnetycznej teorji światła. Jednakowoż trudność kryła się nie tyle we wspomnianem doświadczeniu, ile wogóle w prawach rządzących zjawiskami elektromagnetycznemi.

Obecnie uważamy za prawdę niedopuszczającą wątpliwości, że światło jest zjawiskiem natury elektromagnetycznej. Rozchodzenie się światła jest analogiczne z ruchem falowym, za przykład którego mogą służyć fale morskie lub fale dźwięku. Każdy rodzaj fal rozchodzi się w jakiemkolwiek podłożu materjalnem, ośrodku, jak się wyrażamy w fizyce. Dla fal dźwiękowych tym ośrodkiem jest powietrze albo wogóle jakie bądź ciało sprężyste. Twórcy teorji falowej światła wprowadzili naturalne przypuszczenie, że ruch fal świetlnych od

bywa się w ośrodku wypełniającym wszechświat i nazwanym eterem. Gdy nastąpiło zlanie się nauki o świetle z nauką o elektryczności i magnetyzmie, eter uznano za wspólne podłoże fal świetlnych i objawów elektromagnetycznych. Naprz. w tymże eterze muszą rozchodzić się fale elektromagnetyczne wysyłane przez stacje radjotelegraficzne.

Olbrzymia rola, jaką odgrywają elektryczność i magnetyzm w przyrodzie, jest bezspornym faktem i wobec tego szczególnej doniosłości nabierało pytanie, czy da się do nich zastosować mechanika Newtonowska? Niepodobna tutaj omawiać tego zagadnienia w całej rozciągłości. Dla naszego celu wystarczy podać niezbędne wyjaśnienia, wiążące się z poprzedzającymi wywodami. Zapytujemy, czy do zjawisk elektromagnetycznych, a więc i świetlnych stosuje się mechaniczna zasada względności, czy więc przebieg tych zjawisk jest jednakowy, gdy je odnosimy do każdego z dwu układów spółrzędnych, poruszających się względem siebie prostolinjowo i jednostajnie. Henryk Hertz, któremu świat zawdzięcza odkrycie fal elektromagnetycznych, sformułował podstawowe prawa elektryczności i magnetyzmu tak, ażeby utrzymać zgodność z mechaniczną zasadą względności. Możemy jednak z wszelką pewnością twierdzić, że teorja Hertza nie jest zgodna z doswiadczeniem i musi być odrzucona.

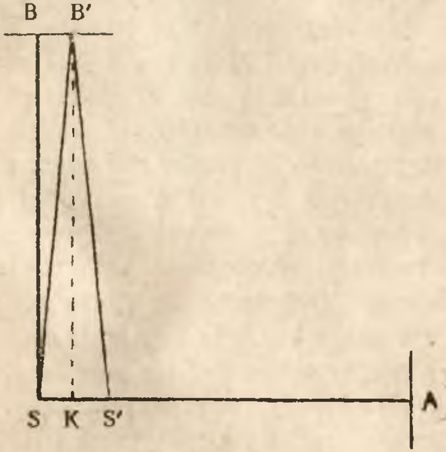
Ogromne zasługi w sprawie wyjaśnienia zjawisk elektromagnetycznych położył znakomity fizyk holenderski Lorentz, twórca matematycznej teorji elektronów. Jemu udało się przezwyciężyć w znacznej mierze trudności, których nie usunął Hertz, ale za podstawę swej teorji zmuszony był przyjąć postulat niezgodny z mechaniczną względnością; ów postulat głosi, iż eter, w którym odbywają się zjawiska elektromagnetyczne, jest ośrodkiem całkowicie nieruchomym. Skoro rzecz tak się ma, dwa układy spółrzędnych, z których jeden spoczywa w eterze, drugi zaś porusza się względem pierwszego ruchem

prostolinjowym i jednostajnym, nie mogą być identyczne w stosunku do zjawisk odniesionych do nich. Teorja Lorentza daje nam zatem bezwzględny układ spółrzędnych: jest to układ spoczywający w eterze. Zjawiska mechaniczne odbywają się jednakowo w każdym układzie poruszającym się jednostajnie i prostolinjowo względem układu astronomicznego, w którym, jak możemy założyć, eter spoczywa; w zjawiskach optycznych i elektromagnetycznych powinna ujawnić się różnica. Ziemia znajduje się w ruchu odnośnie do układu astronomicznego spółrzędnych; otóż doświadczenie Michelsona-Morleya miało właśnie na celu uwidocznienie, że ruch ziemi w eterze ujawni się w określonem zjawisku optycznem.

Idea doświadczenia w najbardziej uproszczonem ujęciu jest następująca. Dwie sztaby równej długości są ustawione pod kątem prostym; na końcach *A* i *B* sztab znajdują się zwierciadła prostopadłe do sztab. Dzięki specjalnemu urządzeniu, którego nie opisuję, wiązka promieni światła rozdziela się w punkcie *S* na dwie wiązki; jedna przebiega w kierunku *SA*, odbija się od *A* i wraca tą samą drogą do *S*, druga biegnie w kierunku prostopadłym *SB* i po odbiciu od zwierciadła *B* też wraca do *S* (rys. 4).

Ziemia względem układu astronomicznego znajduje się w ruchu, zakreślając w ciągu roku dokoła słońca drogę niezbyt różniącą się od okręgu koła. Na przeciąg krótkiego czasu, jakiego wymaga doświadczenie, możemy przyjąć ruch ziemi za prostolinjowy i jednostajny; prędkość ruchu wynosi około 30 km./sek. Razem z ziemią porusza się nasz przyrząd. Promienie światła przebiegają w eterze nieruchomym niezależnie od ruchu ziemi. Założyliśmy, iż eter jest nieruchomy w układzie astronomicznym. Niech sztaba *SA* jest ustawiona w kierunku ruchu ziemi. Promień wybiegający z *S* i dążący do zwierciadła *A*, musi je dopędzać, albowiem

zwierciadło ucieka przed nim wraz z ziemią. Jeżeli oznaczymy prędkość światła w eterze przez c, prędkość ziemi przez v, to prędkość promienia względem ziemi i zwierciadła A będzie $c-v$. W powrotnej drodze promień biegnie na spotkanie punktu S i jego prędkość względem ziemi jest teraz $c+v$. Oznaczając długość SA przez l, widzimy, że czas t przebiegu promienia tędy i z powrotem wyraża się wzorem: $t=\frac{l}{c-v}+\frac{l}{c+v}=\frac{2lc}{c^2-v^2}=\frac{2l}{c}\frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}}$.



Rys. 4.

Gdyby ziemia była nieruchoma w eterze, ten czas przebiegu wynosiłby $\frac{2l}{c}$. Na skutek ruchu ziemi zmienia się również czas przebiegu promienia, odbywającego drogę od S ku zwierciadłu B i z powrotem; w tym czasie, który oznaczamy przez t', cały przyrząd wraz z S i zwierciadłem przesunie się w kierunku SA; promień wychodzący z S musi

być skierowany ku zwierciadłu B nieco ukośnie w kierunku SB', ażeby po odbiciu trafił do punktu S', w którym znajdzie się punkt S; przytem $SS' = vt'$, $SB' = \frac{1}{2} ct'$. Z pomocą trójkąta $SB'K$ otrzymujemy $(\frac{1}{2} ct')^2 = l^2 + (\frac{1}{2} vt')^2$ albo $t'^2 (c^2 - v^2) = 4 l^2$, skąd $t' = \frac{2\,l}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$.

Napisane wzory na t i t' wskazują, iż czas ruchu światła po drodze pierwszej jest nieco dłuższy. Obserwacja prążków interferencyjnych, wytwarzanych w miejscu spotkania się obu promieni, daje możność wykryć istnienie tej różnicy.

Otóż ani Michelson i Morley, ani inni uczeni, którzy to doświadczenie powtarzali, żadnej dostrzegalnej różnicy w położeniu prążków skonstatować nie zdołali. Można tu uczynić zarzut, iż założenie, jakoby eter spoczywał względem układu astronomicznego, t. j. względem słońca, jest dowolne i nawet nieprawdopodobne, ponieważ słońce porusza się wśród gwiazd, jak twierdzą astronomowie. To wszakże postaci rzeczy nie zmienia. Doświadczenie omawiane powtarzano wielokrotnie w ciągu roku, gdy ziemia miała rozmaite kierunki ruchu, i zawsze wynik był ten sam, negatywny.

Wniosek nieuchronny, stąd wypływający, opiewa, iż niepodobna wykryć ruchu jakiegokolwiek układu względem eteru, w którym rozchodzi się fala świetlna. Jak ten wniosek pogodzić z nieruchomością eteru? Czy dopiero Einstein rozwikłał trudności swem rewolucyjnem wystąpieniem?

Wypada tutaj zaznaczyć, że Lorentz zdołał uratować swoją teorję i usunąć niezgodność z doświadczeniem. Rozpatrując doświadczenie Michelsona-Morleya, widzieliśmy, że promień światła w kierunku ruchu ziemi SA przebiega nieco dłuższą drogę, aniżeli w kierunku prostopadłym SB. Doświadczenie jednak różnicy dróg nie wykazuje. Wkrótce po

ogłoszeniu tego wyniku Fitzgerald przypuścił, że różnicę wskazaną znosi pewien wpływ eteru na poruszające się w nim ciała; mianowicie sztaba *SA* położona w kierunku ruchu ziemi w eterze kurczy się w takim stopniu, że różnica dróg zostaje dokładnie skompensowana. Ta hipoteza Fitzgeralda wydawała się sztuczną i urobioną ad hoc; jednakowoż Lorentz potrafił ją powiązać z ogólną teorją elektromagnetyczną materji i uczynić mniej dowolną. Nawet wnioski doświadczalne, wyprowadzone przez niego ze zmodyfikowanej teorji i dotyczące zależności między masą elektronu i prędkością jego ruchu sprawdziły się doskonale. Wydać się mogło, iż sprawa została jako tako załatwiona.

I oto w rok po ogłoszeniu przez Lorentza zmodyfikowanej teorji nieruchomego eteru ukazała się praca Einsteina, zawierająca podstawy specjalnej teorji względności. Stanowisko, jakie zajął Einstein, wywołało zdumienie swą śmiałością i niezwykłością; jeżeli jednak nawiążemy jego myśl do wyżej przeprowadzonych rozważań, nie wyda się ona paradoksalną.

Jaki wniosek najbardziej naturalny zdaje się wynikać z doświadczenia Michelsona oraz innych, wykonywanych z myślą, że ruch ziemi wywrze wpływ na rozmaite zjawiska optyczne i elektromagnetyczne? Oto ten, że zasada względności ma zastosowanie nietylko w mechanice, lecz i w dziedzinach elektromagnetyzmu i optyki. Podobnie, jak obserwator zamknięty w kajucie statku płynącego bez wstrząśnień prostolinjowo i jednostajnie, nie zdoła wykryć, iż znajduje się w ruchu, za pomocą doświadczeń mechanicznych, tak samo nie ujawnią mu tego ruchu żadne doświadczenia optyczne i elektromagnetyczne. Takim statkiem, płynącym bez wstrząśnień jest ziemia, której ruch w przeciągu krótkiego czasu można uważać, jak mówiliśmy, za prostolinjowy i jednostajny.

Opierając się na tem, Einstein za punkt wyjścia swej teorji wziął postulat względności: prawa przebiegu jakiegokolwiek zjawiska przyrody są te same w dwu układach, znajdujących się względem siebie w ruchu prostolinjowym i jednostajnym. Widzieliśmy, iż istnieje układ spółrzędnych, zwany astronomicznym, względem którego prawa mechaniki mają postać najprostszą. W myśl postulatu Einsteina wszystkie prawa przyrody, nietylko mechaniczne, zachowują swą postać najprostszą, gdy je odnosimy do układów, poruszających się względem układu astronomicznego ruchem jednostajnym i prostolinjowym.

§ 4. **Względność jednoczesności**.

Uważny czytelnik tu skonstatuje sprzeczność w naszych wywodach. Mówiliśmy, że próba Hertza zastosowania do zjawisk elektromagnetycznych zasady względności, wziętej z mechaniki klasycznej, nie powiodła się. Teraz powiadamy, że zasada jednobrzmiąca Einsteina obowiązuje wszystkie zjawiska. Jasną jest rzeczą, iż pomiędzy obu zasadami musi istnieć różnica.

Wyrazem mechanicznej zasady względności jest przekształcenie Galileusza, $x' = x - vt$; gdybyśmy je zachowali, wpadlibyśmy w niezgodność z doświadczeniem, która zmusiła do odrzucenia teorji Hertza. Einstein więc zastępuje napisany wzór innym, który podamy w paragrafie 5-ym. Czytelnik zapyta ze zdumieniem: co tu może być zmienione? Odpowiedź rzeczywiście jest niezwykła. Uzasadniając ten wzór, uczyniliśmy milczące założenie, iż pomiary długości i czasu wykonane w układzie XYZ, który uważamy za nieruchomy, dają te same wyniki, jak w układzie $X'Y'Z'$, poruszającym się względem pierwszego. Według Einsteina te pomiary w obu układach nie będą zadość czyniły równaniu (1). Innemi słowy, miary przestrzeni i czasu w roz-

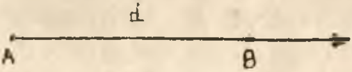
maitych układach nie są te same. Długości ulegają zmianie, gdy przechodzimy od jednego układu do drugiego, poruszającego się względem pierwszego; zjawiska równoczesne w jednym układzie, nie są takiemi w drugiem. Jakto, zdumie się czytelnik, jeżeli na ziemi, dajmy na to, w Europie i Ameryce zaszły jednocześnie dwa zjawiska, to dla mieszkańców Marsa nie będą one jednoczesnemi? Tak jest, i krótka dyskusja natychmiast wykaże, iż niema tu niedorzeczności. Gdy mówimy, iż dwa zjawiska są jednoczesne, to, ażeby to zdanie miało wartość naukową, powinniśmy wskazać, jakim sposobem tą równoczesność stwierdzamy. Do tego celu służą zegary sprawdzone na jednakowy chód i porównane ze sobą. Zagadnienie więc sprowadza się do tego, ażeby ustalić sposób porównywania zegarów w różnych miejscach.

Fizyk nie zna lepszego sposobu, jak użycie sygnałów radjotelegraficznych lub świetlnych, co zresztą na to samo wychodzi, albowiem światło jest zjawiskiem elektromagnetycznem. Obecnie wielkie stacje radjotelegraficzne komunikują swój czas w celu regulowania zegarów w krajach cywilizowanych. Jeżeli sygnał został wysłany w chwili t, stacja odbiorcza powinna nastawić swój zegar na czas $t + \frac{d}{c}$, w czem d oznacza odległość stacyj, c prędkość światła czy fal Hertza. Iloraz $\frac{d}{c}$ wyraża czas przebiegu fali elektromagnetycznej od stacji nadawczej do odbiorczej. Wobec olbrzymiej prędkości tych sygnałów, równej 300.000 km/sek., można w praktycznem zastosowaniu na ziemi poprawkę na czas $\frac{d}{c}$ pominąć.

Ale my rozstrząsamy rzeczy zasadnicze. Tu zaraz nasuwa się zarzut, że ta metoda, dla celów praktycznych doskonała, jest pod względem teoretycznym nieokreślona. Gdy

obserwatorowie A i B są w ruchu, znajdując się naprzykład na ziemi, i kierunek ruchu jest AB (rys. 5), to sygnał wysłany w chwili t przez A dopędza B tak, jak w doświadczeniu Michelsona i czas w chwili odbioru winien być większy od $t + \frac{d}{c}$.

Temu zaprzecza Einstein; swoją teorją względności w odróżnieniu od mechanicznej względności buduje on na dodatkowym postulacie, że prędkość światła (i wogóle fal elektromagnetycznych) jest stała we wszystkich układach, poruszających się prostolinjowo i jednostajnie jeden względem drugiego. To znaczy, iż obserwator B powinien swój zegar nastawić na czas $t + \frac{d}{c}$ niezależnie od wspólnego ruchu, w jakim mogą się znajdować obaj obserwatorowie A i B.



Rys. 5.

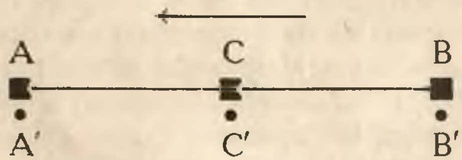
Na korzyść postulatu można przytoczyć doświadczenie Michelsona; ono wskazuje, iż nie możemy wykryć różnicy w czasie przebiegu promienia światła w kierunku ruchu ziemi i w kierunku prostopadłym: stąd nasuwa się bezpośredni wniosek, że prędkość światła wogóle od ruchu układu nie zależy i jest ta sama we wszystkich kierunkach. Postulat stałej prędkości światła prowadzi do miar przestrzeni i czasu niezgodnych z przekształceniem Galileusza i odbiegających rażąco w koncepcji od zakorzenionych przyzwyczajeń umysłu ludzkiego.

Błędem byłoby mniemać, że postulat stałej prędkości światła jest umową, sposobem mierzenia czasu; z punktu widzenia Einsteina zjawiska przyrody odbywają się zgodnie

z tym postulatem, naprz. prążki interferencyjne w przyrządzie Michelsona nie przesuwają się, gdy go w odpowiedni sposób obracamy: nie możemy przecież wejść w umowę z prążkami interferencyjnemi. Nie znaczy to jednak, że poza tłumaczeniem Einsteina niemożliwe są inne tłumaczenia tegoż faktu doświadczalnego. Wyżej wzmiankowaliśmy o tłumaczeniu Fitzgeralda-Lorentza.

Udowodnimy teraz na podstawie postulatu Einsteina, że dwa zdarzenia jednoczesne względem danego układu odniesienia nie są takiemi w stosunku do drugiego układu, który porusza się względem pierwszego ruchem prostolinjowym i jednostajnym. Skorzystamy w tym celu z często przytaczanego przykładu.

Na ziemi w punktach A' i B' znajdują się w bardzo znacznej od siebie odległości dwaj obserwatorowie i pośrodku w C' — trzeci obserwator (rys. 6). Obserwatorów będziemy



Rys. 6.

oznaczali temi samemi literami. Obserwatorowie A' i B' w umówionych i tych samych momentach wysyłają do C' sygnały świetlne albo radjotelegraficzne często się powtarzające. Jeżeli zegary wszystkich trzech obserwatorów są uprzednio uregulowane za pomocą takichże sygnałów, w takim razie równocześnie wysyłane sygnały będą jednocześnie przybywać do C', t. j. będą się zlewać w oku obserwatora C'. Tuż obok naszych obserwatorów przebiegają po torze prostolinjowym ze stałą prędkością trzy wozy elektrycz-

ne A, B i C, utrzymywane w stałej od siebie odległości przy pomocy urządzenia, nad którem nie potrzebujemy się rozwodzić, przyczem $AC = CB = A'C' = C'B'$. W tym układzie trzech wozów jadą obserwatorowe A, B i C, którzy uregulowali swoje zegary w ten sam sposób jak A', B' i C' za pomocą sygnałów wysyłanych z A i B. Przypuśćmy, że A' i B' wysyłają jeden ze swoich sygnałów właśnie w chwili gdy B znajduje się tuż obok B' i A obok A', a zatem C obok C'. Sygnały, jak zawsze, zleją się w oku obserwatora C'. Zapytujemy, czy obserwator C przyjmie obydwa sygnały też jednocześnie. Oczywiście, że odpowiedź jest przecząca, ponieważ on dąży na spotkanie sygnału wysłanego z A' i ucieka od sygnału wysłanego z B'. Pierwszy sygnał wcześniej go dosięgnie, aniżeli drugi. Obserwator C' wywnioskuje, iż sygnały z A' i B' nie są podawane równocześnie. Gdyby obserwatorowie A i B wysyłali sygnały równocześnie według swoich zegarów, to one zlewałyby się w oku obserwatora C, ale obserwator C' widziałby rozdzielonymi w czasie sygnały wysłane w chwili, gdy A i B zeszły się z A' i B'. Znaczy to, że zegary w obu układach nie są i nie mogą być zgodnemi.

Ale, powiedzą mi, nieporozumienie polega na tem, że obserwatorowie A, B i C nie uwzględniają tego, iż znajdują się w ruchu. Otóż według postulatu względności niema spoczynku i ruchu bezwzględnych. Obserwatorowie A, B i C mogą założyć, iż są w spoczynku, a ziemia względem nich się porusza. Conajwyżej wolno stwierdzić, iż w stosunkach ziemskich dogodniej jest uważać ziemię za nieruchomą w stosunku do istot i przedmiotów na niej się mieszczących.

Jeżeli takie postawienie kwestji zanadto urąga naszym przyzwyczajeniom, powołamy się na inny obraz. Wyobraźmy sobie, iż dzięki postępom wiedzy i techniki uzyskaliśmy możność komunikowania się z najbardziej odległemi świa-

tami. Skutkiem tego astronom ziemski jest w stanie przesyłać swoje obserwacje astronomowi, zamieszkującemu naprz. planetę w układzie najbliższej nas gwiazdy, α Centauri. Jak wiadomo, gwiazdy są podobne do naszego słońca i mają częstokroć, według współczesnych badań, znacznie większe od słońca rozmiary. Układy słoneczny i α Centauri znajdują się względem siebie w ruchu, który niewątpliwie można uważać na dłuższy okres czasu za prostolinjowy i jednostajny. Obaj astronomowie notują z ogromną ścisłością czas i miejsce rozmaitych zjawisk we wszechświecie. Śród tych notowań znajdziemy wskazówki, iż przez danego astronoma były zaobserwowane jednocześnie dwa zjawiska w punktach A i B nieba. Otóż, gdy astronomowie zakomunikują sobie swoje obserwacje, pokaże się, iż wszystkie zjawiska, zanotowane jako jednoczesne przez obserwatora ziemskiego, są rozdzielone w czasie przez obserwatora z układu α Centauri i naodwrót. Skonstatowawszy ten fakt niezgodności, jeden z obserwatorów prześle swemu koledze następującą depeszę: „w swoich notowaniach czasu nie uwzględniłeś Pan, iż jesteś w ruchu". Ale oczywistą jest rzeczą, iż identyczną depeszę może drugi astronom przesłać pierwszemu i rozstrzygnięcie, kto z nich ma rację, jakie zjawiska są rzeczywiście równoczesne, wydaje się niemożliwem. Einstein powiada, iż samo pytanie jest pozbawione sensu.

§ 5. Przekształcenie Lorentza.

Przeprowadzone przez nas rozważania wyczerpują ideowe podstawy teorji Einsteinowskiej. Dalszym ciągiem może być tylko wyciągnięcie wniosków i zastosowanie do szeregu zjawisk, które sprawiały trudności teorjom dawniejszym. Śród wniosków z tej teorji napotykamy takie, które na pierwszy rzut oka zdawać się mogą wyzwaniem zdrowego

na świat poglądu. Kto jednak z czytelników zgodził się z możliwością rozwiniętego powyżej punktu widzenia, zmuszony będzie uznać, iż wnioski poniższe są jego logiczną konsekwencją. Wypada dorzucić jeszcze jedną uwagę. Do wykrycia wszystkiego, co zawiera w sobie teorja fizyczna, niezastąpionem jest potężne narzędzie analizy matematycznej. Pragnąc unikać matematyki, musimy ograniczyć się do krótkiego przeglądu wniosków i zastosowań w tej myśli, że głównym celem tych wykładów jest uwidocznienie fundamentów ideowych, na których wznosi się gmach teorji.

Wszystkie wywody płynące z teorji względności specjalnej otrzymujemy z pomocą tak zwanego przekształcenia Lorentza. Nazwa jest usprawiedliwiona tem, że je odkrył Lorentz i zużytkował w swej teorji jako pomocniczą metodę rachunkową. U Einsteina to przekształcenie wynika bezpośrednio z podstaw teorji względności i gra w niej rolę najważniejszą. Widzieliśmy, że mechanika klasyczna wprowadza względność opartą na przekształceniu Galileusza (1) § 2. W Einsteinowskiej teorji jest ono zastąpione właśnie przez przekształcenie Lorentza.

Wyobraźmy sobie znowu dwa układy spółrzędnych takie same, jakie były uprzednio rozpatrywane (rys. 3). Niech jeden układ (XYZ) jest nieruchomy, drugi zaś $(X'Y'Z')$ porusza się względem niego z prędkością stałą v w kierunku osi x. Osie zatem X i X' zawsze się zlewają, Y i Z zostają równoległe do Y' i Z'; ponadto niech w chwili początkowej $(t = o)$ początek O' ruchomego układu zlewał się z początkiem O układu nieruchomego. Podkreślam, iż nieruchomość układu (XYZ) jest kwestją umowy, równie dobrze moglibyśmy uważać, że układ $(X'Y'Z')$ jest nieruchomy i (XYZ) porusza się względem niego w przeciwnym kierunku z tą samą prędkością.

W obu układach znajdują się obserwatorowie A i B,

zaopatrzeni w podziałki i zegary. Zakładamy, iż obaj sprawdzili zgodność swoich miar długości i czasu, nim obserwator *B* znalazł się w ruchu względem *A*. Posługując się swemi narzędziami, obserwatorowie mogą mierzyć w swoich układach określone długości i odstępy czasu między temi samemi zjawiskami. Przypuśćmy, iż obserwatorowie wymierzyli położenie w przestrzeni i czas jakiegokolwiek zjawiska. Znaczy to, iż obserwator *A* znalazł z pomocą swojej podziałki odległości x y, z miejsca, w którem odbyło się zjawisko, od trzech płaszczyzn spółrzędnych układu (XYZ) i odczytał na swoim zegarze czas t; tak samo obserwator *B* wymierzył spółrzędne x', y', z' i czas t' tego samego zjawiska za pomocą swoich narzędzi. Zapytujemy, jaka zależność istnieje między wielkościami uzyskanemi przez obu obserwatorów. Zgóry zaznaczamy, że ruch układów (XYZ) i $(X'Y'Z')$ względem siebie nie wywiera wpływu na długości mierzone w kierunkach prostopadłych do kierunku ruchu, to znaczy na spółrzędne y' i z'.

Ustanowienie szukanej zależności opiera się na kamieniu węgielnym teorji względności, na postulacie, że prędkość światła, mierzona w układach inercyjnych, poruszających się względem siebie prostolinjowo i jednostajnie, jest ta sama; oznaczyliśmy tę prędkość przez c. Wyprowadzeniem wzorów zajmować się nie będziemy, albowiem to zadanie odwiodłoby nas od celu głównego.

Mają one postać następującą:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \; y = y', \; z = z' \; (1); \; t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \; (2).$$

Ten zespół równań nazywa się przekształceniem Lorentza i jest wyrazem matematycznym specjalnej teorji względności.

Według przekształcenia Galileusza długość x' wymierzona przez obserwatora B od początku O' poruszającego się układu (rys. 3) równa się odległości x, wymierzonej przez obserwatora A od początku O układu nieruchomego, mniej odległość OO', która równa się vt, ponieważ O' porusza się względem O z prędkością stałą v. W przekształceniu Lorentza ta równość znika. Niepodobna jednak zaprzeczyć temu, iż $OP = OO' + O'P$, przeto, skoro $x' \neq x - vt$, nieuniknionym staje się wniosek, że na skutek ruchu podziałka obserwatora B zmieniła swą długość, mianowicie skróciła się z punktu widzenia obserwatora A, ponieważ według wzoru (1) $x' > x - vt$ (długość $O'P$ wymierzona krótszą podziałką będzie wyrażać się większą liczbą). Nie koniec na tem. Mechanika klasyczna nie przewiduje również, ażeby czas miał zależeć od ruchu układu: czasy t' i t w układach (XYZ) i $(X'Y'Z')$ według przekształcenia Galileusza są te same. Tak nie jest w teorji względności. Czas odczytany na zegarze ruchomym nietylko jest różny od t, lecz zależy, jak widzimy ze wzoru (2), od położenia, wyznaczonego przez spółrzędną x.

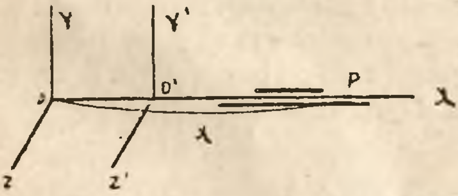
Z łatwością możemy przekonać się, że przekształcenie Lorentza istotnie daje w układach (XYZ) i $(X'Y'Z')$ jednakową prędkość światła. Stwierdzenie tego faktu niech zastąpi wywód przekształcenia. Przypuśćmy, iż promień światła w chwili $t = o$ wybiegł z punktu O: po upływie czasu t dosięgnie on punktu P, którego spółrzędna $x = ct$. Z punktu widzenia niezmienności miar, przyjętego w mechanice klasycznej, spółrzędna P względem układu ruchomego będzie $x' = x - vt = (c - v)\,t$. Innemi słowy, wobec tego, że światło biegnie w kierunku ruchu układu $(X'Y'Z')$, prędkość jego względem tegoż układu jest $c - v$.

Postulat stałej prędkości światła w teorji względności przeciwnie wymaga, ażeby obok równania $x = ct$ było speł-

nione $x' = ct'$. Przekształcenie Lorentza czyni zadość temu wymaganiu. Połóżmy w równaniach (1) i (2) $x = ct$; otrzymamy $x' = \frac{(c - v)\, t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, $t' = \frac{\left(1 - \frac{v}{c}\right) t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$; dzielimy pierwsze równanie przez drugie: $\frac{x'}{t'} = c$, albo $x' = ct'$, co było do okazania.

§ 6. Zmiany miar długości i czasu. Dodawanie prędkości.

Zmiany długości i czasu skutkiem ruchu z łatwością obliczymy przy pomocy wzorów (1) i (2) poprzedzającego paragrafu. Przypuśćmy, że obserwator w układzie ruchomym położył w kierunku osi x swoją podziałkę metrową i niech



Rys. 7.

spółrzędna początku podziałki jest x'_1, końca zaś x'_2, wtedy $x'_2 - x'_1 = 1$ (rys. 7). Długość tejże podziałki wymierzył obserwator nieruchomy w ten sposób, iż on i jego pomocnicy zanotowali, z jakiemi kreskami podziałki nieruchomej zbiegają się początek i koniec sztaby metrowej ruchomej

w chwili t. Niech spółrzędne początku i końca sztaby względem układu nieruchomego są x_1 i x_2; długość sztaby w tym układzie będzie $x_2 - x_1$; oznaczamy ją przez d. Otóż według (1) § 5:

$$x_1' = \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad x'_2 = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \text{ skąd } x'_2 - x'_1 = 1 =$$

$$= \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \text{ albo } x_2 - x_1 = d = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1.$$

Obserwator nieruchomy, biorąc na uwagę, iż przy sprawdzaniu początkowem podziałki jego i obserwatora B były równe, powie, że podziałka wprawiona w ruch skurczyła się. Zmniejszenie długości jest tem znaczniejsze, im mniej v różni się od c. Oczywiście, gdyby obserwator B wymierzył długość podziałki obserwatora A, znalazłby takie same skrócenie.

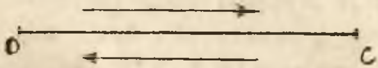
Przypuśćmy dalej, że w początku spółrzędnych ruchomych O' obserwator B umieścił swój zegar, który wskazuje czas t'. Jego chód porównywają w układzie nieruchomym ze wskazaniami sprawdzonych zegarów rozstawionych na osi x i dających czas t. Połóżmy w (2) $x = vt$, taka bowiem jest odległość O' od O w chwili t;

$$\text{dostajemy } t' = \frac{t - \frac{v^2}{c^2} t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \text{ Stąd widzimy,}$$

iż czas t', odczytany na zegarze ruchomym, jest mniejszy, aniżeli czas t układu nieruchomego: zegar ruchomy ustawicznie spóźnia się względem zegara nieruchomego; na początku, jak wiemy, zegary były nastawione na ten sam czas. Zatem

zegar w ruch wprawiony ma chód powolniejszy, aniżeli zegar zostający w spoczynku. Naturalnie te zmiany długości i czasu konstatuje tylko obserwator, względem którego układ z podziałkami i zegarami znajduje się w ruchu. Obserwator biorący udział w tym ruchu żadnych skutków ruchu nie zauważa w myśl zasady względności.

Tutaj nasuwa się refleksja, czy nie są właściwie te zmiany pozorem, rodzajem iluzji. Nie dotykając filozoficznej głębi kwestji, gdzie mamy przed sobą rzeczywistość, gdzie zaś pozór, powołamy się na podany wyżej fizyczny sprawdzian rzeczywistości w świecie zewnętrznym, jako tego, co można stwierdzić w sposób jednakowy dla wszystkich lub wymierzyć. Ten punkt widzenia nie pozostawia wątpli-



Rys. 8.

wości, że dla obserwatora nieruchomego zmiany długości i czasu w układzie ruchomym są rzeczywiste.

Przytoczę zresztą przykład zwany „paradoksem zegarów“, który odrazu wyjaśni, iż nie mamy tu do czynienia z pozorami. Niech dwaj nasi obserwatorowie A i B znajdują się w spoczynku w punkcie O i mają przy sobie uregulowane i jednakowo nastawione zegary. Dalej obserwator B wprawia siebie w ruch i przez pewien przeciąg czasu porusza się razem ze swym zegarem po linji OC (rys. 8) jednostajnie. W punkcie C zatrzymuje się i odbywa powrotną podróż do punktu O, w którym pozostaje pierwszy obserwator. Otóż zegar znajdujący się w ruchu prostolinjowym i jednostajnym idzie powolniej; gdy więc obserwato-

rowie porównają swoje zegary, pokaże się, iż zegar, który był w ruchu, spóźnił się względem zegaru nieruchomego. Jest to najzupełniej poprawny wniosek z teorji względności.

Z tego jednak można ukuć dość niebezpieczny zarzut przeciwko teorji. W rzeczy samej teorja względności przecież mówi, iż niema sposobów odróżnić, który z obserwatorów *A* i *B* znajdował się w ruchu. Obserwator *B* jest uprawniony przez teorję do sądzenia, iż przez cały czas spoczywał, w ruchu zaś był obserwator *A*. Tymczasem uzyskaliśmy konkretny sprawdzian, który z obserwatorów był w ruchu: mianowicie ten, czyj zegar spóźnił się. Odpowiedź na ten zarzut brzmi: teorja względności, którą my teraz zajmujemy się, odnosi się tylko do ruchów prostolinjowych i jednostajnych. Rozpatrywany ruch tego warunku nie spełnia. Dwa razy obserwator *B* wykonał ruch przyśpieszony: gdy puszczał się w drogę z punktu *O* i drugi raz, gdy zawracał w punkcie *C*. Dwa razy też ruch był opóźniony: gdy obserwator zatrzymywał się około punktu *C* w pierwszej połowie podróży i około *O* w drugiej.

Zarazem jednak widzimy, że teorja względności w postaci dotychczasowej jest niewystarczająca, ponieważ kwestje, związane z ruchami, które odbywają się z przyśpieszeniem, pozostawia bez odpowiedzi. Temu żądaniu zadość czyni ogólna teorja względności, w niej paradoks zegarów znajduje rozwiązanie zupełne.

Konsekwencję teorji, wyrażoną w paradoksie zegarów, można ubrać w kształt uderzający wyobraźnię lubo fantastyczny. Temu, kto po upływie dwu lat swego życia pragnie dowiedzieć się, co będzie się działo na ziemi za dwieście lat, Langevin daje następujący przepis. Trzeba, ażeby ta osoba zdecydowała się na podróż w przestrzeni międzygwiazdowej z prędkością bardzo zbliżoną do prędkości światła. Zauważę w nawiasie, iż można wskazać zasadę statku zdat-

nego do lotu i kierowania w próżni, ale nad tem zastanawiać się tutaj nie będziemy. Zegar podróżnika będzie miał chód znacznie powolniejszy, aniżeli zegary ziemskie. W pewnej chwili, po upływie mniej więcej roku, podróżny powinien zawrócić swój statek i odbyć drogę powrotną na ziemię. Jeżeli prędkość ruchu statku była odpowiednio dobrana, nasz podróżnik po powrocie skonstatuje, iż na ziemi upłynęło dwieście lat podczas, gdy on zestarzał się tylko o dwa lata, albowiem według teorji względności wszystkie zjawiska fizyczne, a więc przypuszczalnie i biologiczne regulują się podług czasu względnego.

Nadmienię jeszcze, iż teorja względności pozbawia nas pojęcia, niemniej zrosłego z naszemi przyzwyczajeniami umysłowemi, aniżeli geometrja euklidesowa, właściwie jest ono nawet z tą geometrją ściśle związane. Mam tu na myśli ideę ciała sztywnego. Określamy je, jako ciało, którego cząstki zachowują niezmienną odległość niezależnie od położenia ciała oraz od stanu spoczynku lub ruchu. Skoro według teorji względności wszystkie ciała kurczą się, gdy je w ruch wprawiamy, określenie podane upada i nieuchronnym staje się wniosek, iż w tej teorji ciał sztywnych pomyśleć nie możemy.

Rozpatrzmy teraz dodawanie prędkości, wynikające z przekształcenia Lorentza. Wystawmy sobie, iż jakiekolwiek ciało znajduje się w ruchu jednostajnym wzdłuż osi x z prędkością w' względem układu ruchomego. Zapytujemy, jaką prędkość w to ciało posiada względem układu nieruchomego. Odpowiedź, która dotychczas wydawała się sama przez się zrozumiałą, brzmi: $w = v + w'$. Inaczej rozstrzyga teorja względności.

Przypuśćmy, iż w chwili $t = t' = o$ ciało było w punkcie O, z którym też zlewał się w tej chwili punkt O', początek spółrzędnych ruchomych. Po upływie czasu t' odleg-

łość ciała od O' będzie $x' = w't'$. Zastosowujemy wzory (1) i (2) § 5 na t' i x': $w' = \frac{x'}{t'} = \frac{x - vt}{t - \frac{v}{c^2}x}$; dzieląc w prawej części licznik i mianownik przez t i kładąc $\frac{x}{t} = w$, otrzymujemy $w' = \frac{w - v}{1 - \frac{vw}{c^2}}$, skąd: $w = \frac{w' + v}{1 + \frac{w'v}{c^2}}$.

Widzimy, że wypadkowa prędkość jest mniejsza, niż $v + w'$. Z napisanego wzoru wypływa, że składanie dowolnych prędkości v i w' daje zawsze wypadkową mniejszą od prędkości światła, co najwyżej jej równą.

Przypuśćmy naprzykład, że jedna ze składanych prędkości, mianowicie w' równa się c, to znaczy ciało względem ruchomego układu porusza się z prędkością światła. Wtedy $w = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = c$. Składanie prędkości światła z dowolną inną daje tę samą prędkość światła. Jest ona największą prędkością, której nie mogą przekraczać ciała przyrody. Tu przychodzi na myśl analogja z liczbami pozaskończonemi teorji mnogości: naprz. liczba zwana „alef“ przez matematyków, posiada tę własność, iż nie zmienia się, gdy do niej dodamy dowolną liczbę skończoną.

§ 7. Nowa mechanika. Czterowymiarowość świata fizycznego.

Poprzestaniemy na pobieżnym przeglądzie zastosowań teorji względności do rozmaitych dziedzin fizyki. Szereg

zjawisk optycznych w poruszających się ciałach bezpośrednio tłumaczy się przy pomocy przekształcenia Lorentza; są to: aberacja światła gwiazd, związana z ruchem ziemi dokoła słońca; niezupełne unoszenie fal świetlnych przez poruszającą się materję, naprz. wodę; przesunięcie linij widmowych zależne od ruchów ciała świecącego względem obserwatora, czyli tak zwany objaw Dopplera-Fizeau. Starym teorjom światła te zjawiska sprawiały znaczne trudności i dopiero teorja elektronowa zdołała je opanować. Rozumie się, że rezultat doświadczenia Michelsona jest w zgodzie z teorją względności, albowiem posłużył jej przecież za punkt wyjścia.

Teorja względności wprowadza głęboko sięgające przemiany w podstawowe pojęcia mechaniki. Tutaj zresztą jej rola polegała głównie na syntezie pojęć, już ustanowionych przez elektryczną teorję materji. Musimy ograniczyć się do ujęcia w kilku słowach najbardziej charakterystycznej przemiany, mianowicie stanowiska teorji odnośnie do praw zachowania materji i energji. Jeżeli zastosujemy do zjawisk świata zewnętrznego filozoficzne pojęcie substancji, to powiemy, iż istnieje byt od nas niezależny, którego objawami są zjawiska, stanowiące przedmiot nauk o przyrodzie. Substancję związaną z pojęciem bytu zewnętrznego, nazywamy materją; wolno więc twierdzić, że fizyka i chemja zajmują się badaniem własności materji, inne zaś nauki przyrodnicze za swój przedmiot mają opis określonych grup zjawisk we wszechświecie i zastosowanie do nich praw fizyki i chemji.

Materja łączy w sobie cechy bierności czyli bezwładności i aktywności. Newton określił bezwładność w swojem pierwszem prawie dynamicznem słowami: „każde ciało trwa w stanie spoczynku albo ruchu jednostajnego i prostolinjowego, dopóki przez siły zewnętrzne nie zostanie zmuszone stan swój zmienić". Bezwładność jest mierzalna: za miarę jej służy masa.

Cecha aktywności, posiadana przez materję, wyraża się

tem, że ciało dane lub układ, jako obszar mniej lub więcej samodzielny wydzielony z materji, mogą stanowić źródło pracy mechanicznej, wykonanej na zewnątrz układu. Powiadamy, iż układ posiada energję, której miarą jest właśnie całkowita ilość pracy mechanicznej, jaką zeń uzyskać możemy.

Niezniszczalność materji znajduje swój wyraz w prawach zachowania, obejmujących obie cechy bierną i aktywną: mamy zachowanie masy i zachowanie energji. Nie brakło usiłowań sprowadzenia obu praw do jedności, dopiero jednak teorja elektryczna materji i w ślad za nią teorja względności uczyniły krok stanowczy, wysuwając na plan pierwszy prawo zachowania energji. Faktem doświadczalnym, który wpłynął na podporządkowanie pojęcia masy pojęciu energji, była zmienność masy elektronu. Pokazało się, iż ta najdrobniejsza cząstka materji posiada niezmienny nabój elektryczny ujemny, ale zmienną masę, która szybko wzrasta, gdy prędkość ruchu elektronu zbliża się do prędkości światła.

Już Lorentz wyprowadził wzór na masę elektronu, z którym doświadczenie okazało się w zgodzie. Z tegoż wzoru wynikło, że masa elektronu zależy w całości od energji pola elektromagnetycznego otaczającego elektron. Ten sam wzór daje teorja względności, która wszakże idzie dalej, twierdząc, iż z energją, nagromadzoną gdziekolwiek i w jakiejkolwiek postaci, jest nierozdzielnie związana bezwładność. Jeżeli naprz. ciało zyskuje energję E, równocześnie masa jego powiększa się o $\frac{E}{c^2}$, w czem c, jak wyżej, oznacza prędkość światła w próżni.

Wobec tego prawo zachowania masy traci samodzielność i zlewa się z prawem zachowania energji. Bezpośrednie doświadczalne stwierdzenie tej bezwładności ener-

gji jest trudne z powodu znikomej małości tych wartości energji (wyrażonej w ergach), jakiemi rozporządzamy w doświadczeniach w porównaniu z kwadratem prędkości światła ($c^2 = 9 \cdot 10^{20} \frac{\text{centymetr}^2}{\text{sekunda}^2}$).

Gdy konsekwentnie przyjmiemy, iż każda masa m jest wyrazem zapasu energji E, przyczem $E = mc^2$, wyniknie, że w cząsteczkach materji są skupione niezmierne ilości energji, których wszakże spożytkować nie umiemy.

Zapytają nas teraz: „wprawdzie teorja względności, wprowadzając przekształcenie Lorentza, zyskuje możność wytłumaczenia zjawisk elektromagnetycznych i optycznych, ale czy przez to nie staje w sprzeczności ze zjawiskami mechanicznemi, które przecież doskonale tłumaczyła mechanika Newtonowska, związana z przekształceniem Galileusza?" W odpowiedzi powołamy się na fakt, że wszystkie ruchy, do których mechanika klasyczna była z powodzeniem stosowana, mają prędkości niezmiernie małe w porównaniu z prędkością światła. Gdy we wzorach na przekształcenie Lorentza usuniemy stosunek $\frac{v}{c}$ (prędkości układu do prędkości światła), otrzymamy wzory identyczne z przekształceniem Galileusza.

Uczyniliśmy wzmiankę, że można rozpatrywać świat zjawisk przyrody jako czterowymiarowy, a to ze względu, że oprócz trzech spółrzędnych, określających położenie punktu zjawiskowego w przestrzeni, musi być wskazany czas, w jakim zjawisko zachodzi. Głębszego jednak znaczenia nie można było upatrywać w tej czterowymiarowości, ponieważ czas był uważany za bezwzględnie niezależny od stosunków przestrzennych. W teorji względności sprawa przedstawia się inaczej. Czas tu traci swą samodzielność wobec przestrzeni Dość spojrzeć na wzór (2) przekształcenia Lorentza, aby prze-

konać się, iż czas t', liczony w układzie ruchomym, zależy od x, to znaczy od położenia w przestrzeni danego zjawiska. Czas i przestrzeń stają się nierozdzielnemi.

Herman Minkowski, wychodząc z tego połączenia stosunków przestrzennych i czasowych w pojęciu czterowymiarowej rozciągłości fizycznej, nadał wszystkim rachunkom teorji względności postać nader przejrzystą, w zastosowaniach nieocenioną. Rzecz znamienna, iż Minkowski dopiął tego przez sprowadzenie wymienionej rozciągłości do formy Euklidesowej, a to w ten sposób, iż zamiast czasu t wprowadził urojoną liczbę $\sqrt{-1}.\ ct.$ Spółrzędnym rzeczywistym w specjalnej teorji względności odpowiada geometrja pseudoeuklidesowa.

Nim przejdziemy do ogólnej teorji względności, postarajmy zdać sobie sprawę z tego, jakie stanowisko należy zająć w stosunku do teorji specjalnej, która jest poniekąd całością w sobie zamkniętą.

Już nadmieniliśmy o tem, iż Lorentz opracował teorję elektronów w postaci, umożliwiającej interpretację wszystkich zjawisk, które również tłumaczy teorja względności. Ludziom skłonnym do kompromisów mogłoby przyjść na myśl, czy nie da się pogodzić obie teorje, przyczem, być może, udałoby się usunąć z teorji względności te tak trudne do przetrawienia pojęcia, jak względność jednoczesności. Nadzieje na to kompromisowe rozstrzygnięcie trudności są jednak płonne.

Obie teorje w swych założeniach zajmują stanowisko przeciwstawne. Teorja Lorentza przyjmuje istnienie eteru nieruchomego, w którym światło się rozchodzi i zarazem wprowadza ruch bezwzględny. takim bowiem jest ruch ciał w eterze. Temi postulatami względność zostaje z fizyki zupełnie wyrugowana.

Naodwrót, teorja względności wymaga odrzucenia hipo-

tezy eteru w znaczeniu Lorentza. Układ spółrzędnych, spoczywający w eterze, musi wyróżnić się wśród innych, poruszających się względem niego.

Według teorji względności wszystkie układy, znajdujące się względem siebie w ruchu prostolinjowym i jednostajnym, są równouprawnione. To twierdzenie unicestwia istnienie eteru, jako ośrodka materjalnego, przewodzącego fale elektromagnetyczne i wypełniającego wszechświat.

Zarazem Lorentz zachowuje pojęcia bezwględnych czasu i przestrzeni, które odrzuca Einstein.

Skoro tak się sprawa przedstawia, powstaje nieuniknione pytanie, na jakim gruncie ma zapaść rozstrzygnięcie, która z tych dwu teoryj powinna być przyjęta. Obie są w zgodzie z doświadczeniem: probierz więc dla fizyka decydujący, jakim jest doświadczenie, tu zawodzi. Nie pozostaje nic innego jak odwołać się do argumentów, mających charakter filozoficzny, ściślej mówiąc, epistemologiczny. Jest więc rzeczą dziwną, na pierwszy rzut oka, ale prawdziwą, iż spór fizyków zostaje oddany do decyzji filozofów. Posłuchajmy, co mówi Lorentz, odznaczający się dużą bezstronnością sądu, w swoich wykładach Haarlemskich, wydanych w roku 1914: „Ocena (podstawowych pojęć teorji względności Einsteina) należy w największej części do nauki o poznaniu i jej można pozostawić wydanie wyroku w nadziei, iż rozpatrzy omawiane kwestje z należytą gruntownością. Jest jednak rzeczą pewną, że będzie zależało w znacznej mierze od sposobu myślenia, do którego dana osoba jest przyzwyczajona, czy pociągnie ją ku sobie więcej jedno, aniżeli drugie pojmowanie rzeczy. Co zaś dotyczy prelegenta, to znajduje on pewne zadowolenie w starym poglądzie, według którego eter posiada bądź co bądź niejaką przedmiotowość (Substanzialität), przestrzeń i czas są wyraźnie odgraniczone i można mówić o jednoczesności bez bliższych określeń".

Jako przykład typowy argumentacji strony przeciwnej, to znaczy zwolenników bez zastrzeżeń teorji względności, przytoczę ustęp z książki Lauego, która jest doskonałym wykładem tej teorji: „Właściwego rozstrzygnięcia doświadczalnego między rozszerzoną teorją Lorentza z jednej strony i teorją względności z drugiej niepodobna dostarczyć; jeżeli więc pierwsza ustąpiła na plan dalszy wobec drugiej, to przyczyna leży w tem, iż brak jej wielkiej, prostej i ogólnej zasady, której posiadanie nadaje teorji względności charakter imponujący".

W innem miejscu, mówiąc o tem, że niema sposobu wykryć doświadczalnie ruchu bezwzględnego w eterze, którego istnienie przyjmuje Lorentz, konkluduje Laue, iż „stanowisko teorji względności jest więcej zadowalające, ponieważ przeczy wszystkim zasadom teorji poznania przypisywanie rzeczywistości fizycznej jakiemukolwiek ciału, jeżeli nie możemy nigdy jego wykryć".

U Einsteina epistemologiczny punkt widzenia najwyraźniej występuje przy przejściu od specjalnej do ogólnej teorji względności, o czem będzie wzmianka w § 14.

Należy wszakże stwierdzić, iż, poza motywami epistemologicznemi,o powodzeniu specjalnej teorji wśród fizyków zdecydowała prostota jej budowy matematycznej, szczególnie w opracowaniu Minkowskiego. Każdy przecie odda pierwszeństwo teorji łatwej w zastosowaniu. Wprawdzie sam Einstein zniszczył prostotę swej pierwszej teorji, podporządkowując ją ogólnej teorji względności, której forma matematyczna jest nader skomplikowana. Zato cały system pojęć o względności przestrzeni i czasu zyskał imponującą jednolitość przez zastosowanie tych pojęć do wszystkich ruchów, podczas, gdy dotychczas mówiliśmy o względności tylko ruchów prostolinjowych i jednostajnych.

§ 8. Geometrja nieeuklidesowa.

Ogólna teorja względności, przeprowadzając do najdalszych konsekwencyj punkt widzenia nieograniczonej względności stosunków przestrzenno—czasowych, zarazem po raz pierwszy wprowadza do nauki o przyrodzie geometrję nieeuklidesową.

Ażeby przygotować grunt do zrozumienia niezwykłych twierdzeń tej teorji, usprawiedliwiających wrażenie przez nią wywarte w szerszych nawet kołach publiczności, podejmiemy nanowo dyskusję nad geometrją nieeuklidesową. Poszukamy odpowiedzi na dwa pytania: po pierwsze, czy geometrje nieeuklidesowe można uważać za równouprawnione z punktu widzenia matematycznego i poznawczego obok geometrji euklidesowej, i po drugie, w jakim stosunku geometrja znajduje się do doświadczenia, zatem i do fizyki, której kamieniem węgielnym jest doświadczenie.

Świetną dyskusję nad temi pytaniami znajdujemy w Poincaré'go „La Science et l'Hypothèse"; z tej pouczającej książki dużo korzystam w paragrafie niniejszym.

Geometrja Euklidesa spoczywa na nielicznych pewnikach, które były uważane za same przez się zrozumiałe przez samego Euklidesa i większość matematyków i filozofów aż do trzeciego dziesięciolecia wieku XIX. Kant, twórca filozofji krytycznej, uznał pewniki Euklidesa za niewzruszone, za słuszne à priori, to znaczy niezależnie od doświadczenia. Byli jednak matematycy, których nie zadowalały podstawy logiczne geometrji i w szczególności słynny postulat Euklidesa o równoległych. Ten postulat głosi, że do każdej prostej przez punkt nie należący do niej można przeprowadzić jedną tylko równoległą, czyli prostą, która leży w tej samej płaszczyźnie z pierwszą prostą i jej nigdzie nie przecina (raczej przecina w nieskończoności). Ów postulat nie wy-

dawał się bezspornym i szukano usilnie w ciągu wieków, czy nie da się udowodnić, jako wniosek z pewników uprzednio przyjętych. Wszystkie usiłowania pozostały bezowocne. Dopiero rosyjski matematyk Łobaczewskij i węgierski Bolyai około roku 1830 uczynili krok stanowczy.

Jak przekonać się, czy postulat równoległych wypływa z pewników uprzednich, czy też jest samodzielnym pewnikiem? Odrzućmy, powiedział Łobaczewskij, ten postulat i budujmy geometrję bez niego. Jeżeli, rozumując logicznie, wpadniemy w sprzeczność, dostaniemy dowód, że postulat Euklidesowy jest zależnym od innych pewników. Idąc za tą myślą, Łobaczewskij zachował inne pewniki Euklidesa, ale przypuścił, że przez punkt, leżący na zewnątrz danej prostej, można przeprowadzić kilka równoległych do niej. Z tych założeń on wysnuł geometrję, to znaczy szereg twierdzeń geometrycznych, i nigdzie nie napotkał sprzeczności logicznych. Twierdzenia tej nowej geometrji brzmią wprawdzie dziwnie dla nas nawykłych do geometrji euklidesowej. Naprz. suma kątów w trójkącie Łobaczewskiego jest mniejsza od dwu prostych i różnica między tą sumą i dwoma prostemi kątami jest zależna od pola trójkąta. Dalej niepodobna wykreślić figury podobnej do danej, lecz mającej różniące się od niej rozmiary.

W r. 1854 Bernhard Riemann wygłosił odczyt habilitacyjny, słynny w dziejach matematyki i myśli ludzkiej wogóle, pod tytułem: „O hipotezach, które leżą u podstawy geometrji". Biorąc za punkt wyjścia najogólniejsze pojęcia o rozciągłości przestrzennej, Riemann wykazał, iż można zbudować z pomocą analizy matematycznej nieskończoną mnogość geometryj nieeuklidesowych, równie poprawnych pod względem logicznym, jak geometrja euklidesowa. Śród tych geometryj znajduje się geometrja Łobaczewskiego oraz względem niej jakby przeciwstawna geometrja sferyczna Rie-

manna, w której do danej prostej nie można wogóle poprowadzić równoległej przez punkt zewnętrzny i suma kątów trójkąta utworzonego z linij najkrótszych, jest większa od dwu kątów prostych.

Zachodzi teraz pytanie, czy jest rzeczą możliwą unaocznić stosunki, panujące w tych przestrzeniach, jak je nazywano, metageometrycznych. Trójwymiarowych przestrzeni rożniących się od Euklidesowej nie możemy oglądać w wyobraźni, ale stosunki, o które nam chodzi, dadzą się bez trudu przedstawić w dwu wymiarach.

Wyobraźmy sobie istoty, mające tylko dwa wymiary, to znaczy pozbawione grubości. Te istoty żyją w płaszczyźnie, z której wyjść nie mogą. Poza płaszczyzną dla nich nic nie istnieje: wszystkie przedmioty o których mogą wytworzyć pojęcia, są płaskie. Jak powiada Poincaré, nic nie stoi na przeszkodzie przypuszczeniu, iż nasze istoty są rozumne i zdolne budować geometrję. Oczywiście, że przestrzeń dla nich ma tylko dwa wymiary. Świat ich jest uboższy o jeden wymiar, ale geometrja, jaką stworzą, będzie tą samą planimetrją, jakiej uczą w naszych szkołach na początku studjów geometrycznych, ażeby po zapoznaniu się ze stosunkami w płaszczyźnie przejść do przestrzeni trójwymiarowej Jednem słowem, niema powodu, aby geometrja tych istot fantastycznych różniła się od euklidesowej i świat ich jest tak, jak nasz, nieskończenie rozciągły, wprawdzie tylko w dwu wymiarach.

Wystawmy teraz sobie, że istoty bez grubości żyją nie w płaszczyźnie, lecz na powierzchni kuli. Ciała tych istot, jeżeli o ciałach może być mowa, przylegają do kuli, mają zatem kształt figur sferycznych tak samo, jak wszystkie przedmioty, które mogą być przez nich obserwowane. Poza powierzchnią kulistą nie istnieje dla nich nic. Jaką geometrję budują te kuliste istoty? Będzie się ona różniła zasadniczo

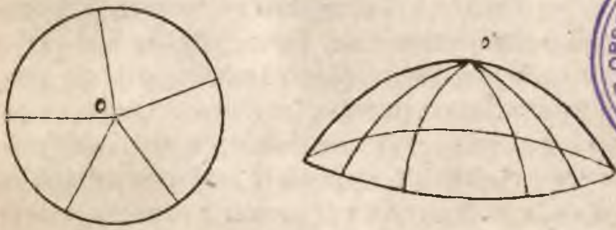
od geometrji istot płaskich, zachowując zresztą cechę dwuwymiarowości. Najkrótszą linją, przeprowadzoną między dwoma punktami, nie jest dla nich linja prosta, linij bowiem prostych na powierzchni kuli niema, lecz odcinek okręgu wielkiego koła, przechodzącego przez dane punkty. Na powierzchni kulistej nie można przez punkt, znajdujący się na zewnątrz danej linji najkrótszej poprowadzić do niej równoległą, ponieważ wszystkie okręgi wielkich kół przecinają się. Między dwoma punktami powierzchni kuli da się wogóle przeprowadzić tylko jedna linja najkrótsza, ale jest wyjątek z tej reguły: gdy dane punkty są przeciwległe (leżą na końcach średnicy kuli), między niemi przechodzi nieskończona ilość linij najkrótszych.

Dalej przestrzeń istot dwuwymiarowych sferycznych posiada tę uderzającą własność, iż ma rozmiary skończone, ponieważ równa się powierzchni kuli, jest wszakże nieograniczona, albowiem na kuli można iść przed siebie, nigdzie nie znajdując granicy, ale idąc po linji najkrótszej, to znaczy po okręgu wielkiego koła, wraca się do punktu wyjścia.

Jeżeli powierzchnia kulista, stanowiąca przestrzeń naszych istot, ma ogromne rozmiary, mała jej część nieznacznie różni się od płaszczyzny, podobnie, jak na małym obszarze ziemi nie zauważamy jej kulistości. Oczywistą jest rzeczą, iż istoty kuliste, używając jakiejkolwiek jednostki długości, naprz. metra, z łatwością wymierzą rozmiary swej przestrzeni.

Zwróćmy uwagę jeszcze na jeden szczegół, odróżniający geometrję płaską pierwszych istot od sferycznej — drugich. Jeżeli z danego punktu *O* na płaszczyźnie (rys. 9) odmierzymy w rozmaitych kierunkach jednakowe długości, końce odcinków będą leżały na okręgu koła i stosunek okręgu do średnicy wyrazi się znaną liczbą stałą π. Jeżeli uczynimy to samo na kuli, odmierzając z punktu *O'* jednakowe długości na linjach, grających dla kuli rolę prostych, t. j. na

okręgach wielkich kół, wtenczas końce odcinków utworzą również okręg koła, ale stosunek długości okręgu do średnicy, równej podwójnej długości odmierzonych odcinków, będzie mniejszy od π. Stosunek uważany staje się coraz mniejszy w miarę tego, jak rośnie promień koła, czyli długość odcinka na okręgu wielkiego koła, odmierzonego z punktu O'. W końcu, gdy dosięgniemy punktu kuli przeciwległego względem O', okręg koła sprowadzi się do tego punktu i stosunek wymieniony będzie równy zeru.



Rys. 9.

W przestrzeni euklidesowej trójwymiarowej można wyobrazić nieskończoną mnogość rozmaitych powierzchni, z których każda może być rozpatrywana jako przestrzeń dwuwymiarowa. Między powierzchniami istnieje ważna dla naszych celów różnica. Przypuśćmy, iż do części danej powierzchni przylega kawałek tkaniny wiotkiej lecz nierozciągliwej, na której jest nakreślona jakakolwiek figura. Nierozciągliwość tkaniny sprawia to, że linje figury podczas ruchów i odkształceń tkaniny mogą zmieniać swój kształt, lecz zachowują niezmienną długość. Spróbujmy teraz przesuwać figurę po powierzchni tak, ażeby jej wszystkie punkty nie traciły zetknięcia z powierzchnią. Przekonamy się, iż nie jest to wogóle możliwe:

na tkaninie będą się tworzyć podczas ruchu zmarszczki, nie przylegające do powierzchni.

Geometrja wskazuje nam przyczynę tego faktu: oto powierzchnie naogół mają w rozmaitych punktach niejednakową krzywiznę. Istnieje wszakże klasa powierzchni, po których figury mogą się przesuwać, nie odkształcając się i nie opuszczając powierzchni. Są to powierzchnie o stałej krzywiźnie: najpospolitszym przykładem takiej powierzchni jest kula.

Tę własność posiada oczywiście i płaszczyzna, której krzywizna jest zerem. Ale naprz. po powierzchni jajowatej nie moglibyśmy w sposób wskazany przesuwać kawałka nierozciągliwej tkaniny. Twory dwuwymiarowe, żyjące na powierzchni o stałej krzywiźnie, przyszłyby do wniosku, że jest możliwy ruch przedmiotu (dwuwymiarowego), nie połączony ze zmianą rozmiarów, podczas, gdy tworom, których powierzchnia ma zmienną krzywiznę, taki ruch wydawałby się niemożliwym. Nadmienić wypada, iż śród powierzchni o stałej krzywiźnie wyróżniamy dwie grupy: jedne mają krzywiznę dodatnią, jak kula, drugie zaś ujemną, jak naprz. tak zwana pseudosfera.

Wyobrażamy bez trudu najrozmaitsze powierzchnie w naszej zwykłej przestrzeni euklidesowej; otóż z ogólnych rozważań Riemanna wynika, że daje się pomyśleć jeszcze większa rozmaitość przestrzeni trójwymiarowych, wprawdzie niedostępnych dla wyobraźni z wyjątkiem przestrzeni euklidesowej. Co więcej, w tym kierunku można iść dowolnie daleko i budować w myśli przestrzenie albo raczej rozciągłości czterowymiarowe, pięciowymiarowe, nakoniec n-wymiarowe, przyczem *n* oznaczać może jakąkolwiek liczbę całkowitą (dodatnią). Riemann okazał, że wszystkie te rozciągłości, śród których naturalnie znajduje się i nasza przestrzeń Euklidesowa, różnią się między sobą postacią jednego tworu geometrycznego zasadniczego, tak zwanej formy metrycznej,

wyrażającej odstęp dwu nieskończenie blizkich punktów danej rozciągłości. Ale dalej nie możemy zapuszczać się w te rozważania geometryczne, poprzestajemy więc na wskazaniu, które w dalszym ciągu zużytkujemy, iż śród rozciągłości trójwymiarowych istnieje przestrzeń kulista, której obrazem w dziedzinie dwuwymiarowej jest powierzchnia kuli.

Przestrzeń kulista Riemanna ma rozmiary skończone, lubo jest nieograniczona podobnie, jak powierzchnia kulista. Linjami najkrótszemi w tej przestrzeni nie są linje proste, lecz krzywe. Zauważę tutaj, iż w geometrji ogólnej przyjęto linje najkrótsze, łączące punkty danej rozciągłości, nazywać geodetycznemi. Jeżeli w przestrzeni kulistej poprowadzimy z danego punktu linje geodetyczne na wszystkie strony, z początku te linje, podobnie, jak w przestrzeni euklidesowej, oddalają się coraz bardziej od siebie, potem jednak zaczynają się zbliżać i w końcu zbiegają się w jednym punkcie. Widzimy tu wyraźną analogję z powierzchnią kuli, na której każdemu punktowi odpowiada punkt przeciwległy, w którym przecinają się okręgi wielkich kół, wychodzące z pierwszego punktu. Analogja sięga dalej. Jeżeli odmierzymy na linjach najkrótszych, wychodzących z danego punktu, odcinki jednakowej długości, końce ich będą leżeć na powierzchni kuli. Ta powierzchnia w przestrzeni kulistej w miarę oddalania się od punktu wyjścia z początku powiększa się, osiąga największe rozmiary, następnie zaczyna maleć i w końcu sprowadza się do punktu.

Wspomnę jeszcze, iż istnieje gatunek przestrzeni, zwany przestrzenią eliptyczną, która różni się od kulistej tem, iż linje geodetyczne, wychodzące na wszystkie strony z jakiegokolwiek punktu spotykają się w tym samym punkcie. W obu przestrzeniach, kulistej i eliptycznej, idąc po linji geodetycznej wrócimy do punktu wyjścia tak, jak na kuli, gdy idziemy po okręgu wielkiego koła. Przestrzenie kulista i eliptyczna

mają stałą dodatnią krzywiznę i przedmioty mogą w nich poruszać się, nie ulegając zmianom rozmiarów.

Dodam, że geometrja Łobaczewskiego odpowiada przestrzeni o stałej krzywiźnie ujemnej.

§ 9. Stosunek geometrji do doświadczenia.

Teraz sformułujemy odpowiedź na pytanie, jak należy zapatrywać się na pewniki geometrji. Wbrew temu, co utrzymywał Kant, możemy twierdzić z pewnością, iż nie są sądami syntetycznemi à priori. Pojęcie aprioryczności w duchu Kanta wyłącza możliwość sądów przeciwnych.

Fakt istnienia geometryj nieeuklidesowych udowadnia możliwość odrzucenia pewników geometrji Euklidesowej, które, jako aprioryczne, Kant uważał za niewzruszone. Z tego faktu nie można jednak wywnioskować, ażeby miała upaść jednocześnie nauka Kanta o aprioryczności formy przestrzennej, która jest nieodłączna od wszystkich naszych wrażeń i wyobrażeń, związanych ze światem zewnętrznym. W każdem pytaniu czy to doświadczalnej, czy teoretycznej natury, jakie stawia przyrodnik w toku swoich poszukiwań, tkwią pojęcia liczby, zależności czy przyczynowości, przestrzeni i czasu. Możemy zgodzić się z Kantem, iż są to niezbędne i w tem znaczeniu aprioryczne warunki wszelkiego doświadczenia.

Ale z tego, iż postrzeganie przedmiotów zewnętrznych jest związane z wyobrażeniem rozciągłości przestrzennej, wcale nie wynika, aby ta rozciągłość musiała à priori mieć własności odpowiadające geometrji euklidesowej. Przeciw temu wnioskowi uczynią zarzut, że geometrje nieeuklidesowe nie mogą być prawdziwe, ponieważ stosunki, panujące w przestrzeniach nieeuklidesowych, są niedostępne dla wyobraźni.

Na to fizyk odpowie, po pierwsze, że fizyka w swojem

ujęciu przyrody coraz bardziej oddala się od tego obrazu, jaki wytwarzają nasze zmysły. Rozmaite promienie niewidzialne, atomy i elektrony, fale radjotelegraficzne nie mogą być przedmiotem oglądu zmysłowego bezpośrednio, lecz tylko w swych dalekich konsekwencjach, dzięki oddziaływaniu na mniej lub więcej skomplikowaną kombinację przyrządów. Po drugie, możemy podać za Helmholtzem następującą definicję wyobrażalności, która daje się zastosować do stosunków przestrzennych i nie zawiera nic, coby mogło wywołać sprzeciw z punktu widzenia przyrodnika. Przedmiot fizyczny w znaczeniu najszerszem wyrazu jest wyobrażalny, skoro możemy wyobrazić te wrażenia, jakie ów przedmiot w nas wywoła za pośrednictwem naszych organów zmysłowych, w najrozmaitszych warunkach doświadczenia, takich przytem, ażeby oddziaływanie przedmiotu na nasze zmysły stało się możliwem. Otóż przedmioty umieszczone w przestrzeniach nieeuklidesowych, naprz. sferycznej albo pseudosferycznej, czynią zadość temu kryterjum. Możemy opisać wrażenia, jakie będzie odbierać od przedmiotów otaczających istota, mająca organy zmysłowe podobne do naszych, jeśli znajdzie się w jednej z tych przestrzeni.

Skoro równouprawnienie logiczne geometryj euklidesowej i nieeuklidesowych nie podlega wątpliwości, powstaje pytanie, która z geometryj jest prawdziwa, która, innemi słowy, odpowiada stosunkom istniejącym w rzeczywistości. Zdawałoby się, że, skoro logika tu nie wydaje wyroku, jedyną instancją rozstrzygającą może być doświadczenie. Zaprzeczyć temu, że doświadczeniu przypada rola ważna, nawet decydująca, zdaniem mojem, niepodobna. Jednakże stosunek geometrji do doświadczenia nie jest tak prosty i wymaga subtelnych rozróżnień.

Przedewszystkiem doświadczenie nie może bezpośrednio obalić systemu geometrycznego, naprz. geometrji euklideso-

wej. Okoliczność, że doświadczenie było prawdopodobnie nicią przewodnią przy wytwarzaniu podstaw geometrji, nie pociąga za sobą wniosku, że geometrja jest od doświadczenia zależna. Nowe doświadczenia nic nie mogą zmienić w systemie logicznym, składającym się z przesłanek, ujętych w formę definicyj, oraz wniosków, z nich wyprowadzonych drogą dedukcji. Takim bowiem systemem jest geometrja euklidesowa zarówno jak nieeuklidesowa.

Nie wykonywamy doświadczeń nad tworami idealnemi, jakiemi są przedmioty geometrji: linje proste, okręgi kół, powierzchnie i t. p. W doświadczeniach fizycznych mamy do czynienia wyłącznie z ciałami i własnościami tychże. Każdą niezgodność z twierdzeniami geometrji euklidesowej, jaką napotykamy przy pomiarach, możemy wytłumaczyć, przypisując ciałom określone własności. Naprzykład, jak już objaśniliśmy w § 1, odstępstwo sumy kątów trójkąta od dwu prostych, gdyby je skonstatowano, można przypisać temu, że droga promienia światła nie jest prosta lecz krzywolinjowa.

Wobec tego Poincaré konkluduje, że pytanie, czy geometrja euklidesowa jest prawdziwa, niema sensu. Analogicznie można byłoby zapytać, czy system metryczny miar jest prawdziwy, czy fałszywy. Daną długość można wymierzyć w metrach i centymetrach i równie dobrze w stopach i w calach. Dana geometrja nie może być prawdziwsza od jakiejkolwiek innej: ona może być tylko dogodniejsza.

Fizykowi wolno, zdaniem mojem, przyjąć nieco różniący się punkt widzenia, więcej zbliżony do metody rozumowania właściwej fizyce.

Będziemy uważali za prawdziwą, czyli odpowiadającą rzeczywistości właśnie tę geometrję, która w zastosowaniu do świata zjawisk pozwala go ująć w system pojęciowy najprostszy, nie wprowadzając powikłań i ad hoc urobionych

przypuszczeń. Tutaj oczywiście rolę kierowniczą obejmuje doświadczenie. Odrazu nasuwa się ważne pytanie: jakie są doświadczenia, które posłużyłyby za podstawę do wyboru geometrji. Odpowiedź była wskazana w § 1: są to doświadczenia odnoszące się do ciał stałych oraz promieni światła, już wprost dlatego, że z ciał stałych są zrobione przyrządy miernicze fizyka, promienie zaś światła odgrywają rolę czynną przy większości pomiarów, szczególnie przy pomiarach kątów.

Obierając ten punkt widzenia, uprzytomnijmy, jakie argumenty przemawiają za naszą zwyczajną geometrją euklidesową. Najpierw jest ona najprostsza śród wszystkich geometryj. Jak powiada Poincaré, prostota jej nietylko wypływa z przyzwyczajeń naszego umysłu albo z intuicji, oglądu bezpośredniego, jaki, być może, posiadamy odnośnie do przestrzeni euklidesowej. Geometrja euklidesowa jest najprostszą sama w sobie podobnie, jak równanie pierwszego stopnia jest prostsze, aniżeli równanie drugiego stopnia. Następnie pomiary i doświadczenia, w których występują ciała stałe i promienie światła, wykazywały zawsze daleko idącą zgodność z geometrją euklidesową. Znaczenie ciał stałych dla budowy geometrji jest niewątpliwe i Poincaré posunął się nawet do twierdzenia, że, gdyby w przyrodzie nie istniały ciała stałe, nie byłoby wcale geometrji.

Należy to rozumieć w znaczeniu, iż wówczas nie byłoby pobudki i oparcia w przyrodzie dla budowy pojęć geometrycznych. W książce cytowanej Poincaré uwidocznił, w jaki sposób umysł ludzki, kierowany przez doświadczenia nad ciałami stałemi, do których, przynajmniej, jako całość, należy nasze własne ciało, był zdolny do wytworzenia pojęć charakteryzujących zasadnicze własności przestrzeni.

Przytoczone uwagi wykazują, iż odrzucenie geometrji euklidesowej może nastąpić tylko pod naciskiem mocnych argumentów, albowiem, odrzucając ją, rezygnujemy z pro-

stoty tej formy przestrzennej, w której występuje świat zjawisk zewnętrznych. Zobaczymy dalej, jakich argumentów używa w tym kierunku ogólna teorja względności.

Trudno jednak zgodzić się z Einsteinem, który w swej książce popularnej o teorji względności w § 24 (patrz bibliografję na końcu niniejszego dziełka) suggeruje myśl, że dokładna zgodność geometrji euklidesowej z rzeczywistością byłaby faktem nienaturalnym. Tak bowiem można rozumieć jego dowcipny przykład. „Oto jest przede mną“, powiada on, „płaska powierzchnia marmurowego stolika. Weźmy kilkanaście sztabek, mających długość jednego, dajmy na to, decymetra każda. Układajmy z tych sztabek czworokąty tak, ażeby boki ich przylegały do siebie i przekątnie były równej długości: będą to kwadraty. Równość przekątni sprawdzamy z pomocą oddzielnej podziałki. Możemy ułożyć w ten sposób trzy kwadraty stykające się w punkcie *O*. Wówczas położenie boków czwartego czworokąta jest już wyznaczone. Wymierzamy jego przekątnie i wypada, iż są równe“. Pomiary w założeniu są wykonywane z bezwzględną dokładnością. Otóż fakt, iż przekątnie okazały się same przez się równemi, jest, jak powiada Einstein, prawdziwym cudem, który wydarzyć się może tylko w przestrzeni euklidesowej. Cudownych zdarzeń wogóle w przyrodzie nie dopuszczamy, czyli, ściśle rzecz biorąc, prawdziwość geometrji euklidesowej w znaczeniu powyżej objaśnionem jest nieprawdopodobna: nie można zatem oczekiwać bezwzględnej równości przekątni. Einstein tego wniosku wprost nie wypowiada, ale rozważania powyższe niewątpliwie mogą go nasunąć. Idąc tą drogą, bylibyśmy uprawnieni do kwestjonowania wszystkich mniej lub więcej prostych praw natury i samej dążności do prostoty, która jest nierozłączona z budową nauki.

Bądź co bądź, stwierdzić musimy, iż w zastosowaniu do przyrody geometrja jest zależna od doświadczenia. Już

Newton w swoich „Principia" wyraził się w tych słowach: „Geometrja ma swe uzasadnienie w praktyce mechanicznej i faktycznie nie jest niczem innem, jak tą częścią ogólnej mechaniki, która dokładnie określa i uzasadnia sztukę mierzenia". Jeżeli zatem zadanie, jakie sobie stawia fizyka teoretyczna, ujęcia zjawisk przyrody w jednolity system pojęć, da się rozwiązać w sposób najbardziej zadowalający za pomocą przypuszczenia, że geometrja euklidesowa ma być zastąpiona przez geometrję nieeuklidesową, nie powinniśmy tej konsekwencji odrzucać.

Poincaré też konstatuje, że istoty rozumne, żyjące w świecie nieeuklidesowym, z konieczności rzeczy przyjęłyby pewniki różniące się od tych, których uczą w naszych szkołach i zbudowałyby geometrję nieeuklidesową, dostosowaną do warunków panujących w ich świecie.

Teraz pozostaje sformułować ostatnie pytanie odnośnie do geometrji, poczem zamkniemy dyskusję przygotowawczą, ponieważ ono prowadzi bezpośrednio do ogólnej teorji względności. Skoro stosunki przestrzenne mają być odkryte na drodze fizycznej, a więc są uzależnione od własności ciał przyrody, zapytujemy, gdzie mamy szukać przyczyn, określających bezpośrednio charakter przestrzeni.

Przytoczę parę ustępów z rozprawy Riemanna w tłumaczeniu prof. Dicksteina. Na początku mówi on: „Wielokrotnie rozciągła wielkość nadaje się do rozmaitych stosunków miarowych, przestrzeń (euklidesowa) więc stanowi tylko szczególny przypadek trójkrotnie rozciągłej wielkości. Tego koniecznem następstwem jest, że twierdzenia geometrji nie dają się wyprowadzić z ogólnych pojęć wielkościowych; lecz, że te własności, któremi przestrzeń wyróżnia się od innych, pomyśleć się dających trójkrotnie rozciągłych wielkości, mogą być tylko powzięte z doświadczenia". Na końcu rozprawy znajdujemy następujące myśli prorocze: „Otóż zdaje się, że

dane empiryczne, na których zasadzają się przestrzenne oznaczenia miarowe, pojęcia ciała stałego i promienia światła tracą swoją moc w nieskończonej małości; można sobie pomyśleć, że stosunki miarowe przestrzeni w nieskończonej małości nie zgadzają się z założeniami geometrji (euklidesowej), co w rzeczy samej należałoby przyjąć, gdyby przez to zjawiska dałyby się wyjaśnić sposobem prostszym... Pytanie o stosowaniu się założeń geometrji do nieskończonej małości jest w związku z pytaniem o wewnętrznej istocie stosunków miarowych przestrzeni... W rozmaitości przerywanej zasada stosunków miarowych jest już zawarta w pojęciu tej rozmaitości, w ciągłej zaś musi być wziętą skądinąd. A zatem, albo rzeczywistość będąca podstawą przestrzeni musi tworzyć rozmaitość przerywaną, albo też istoty stosunków miarowych szukać należy zewnątrz, w wiążących siłach, które w niej działają".

Otóż Einstein znalazł owe wiążące siły, które w myśl Riemanna mają określać stosunki przestrzenne i — dodajmy jeszcze — czasowe. Są to siły ciążenia powszechnego czyli grawitacji.

§ 10. Ogólny postulat względności.

Dotychczasowe nasze rozważania nie były łatwe, ale dopiero teraz mamy pokonać trudności największe. Dotarliśmy bowiem do progu ogólnej teorji względności; będziemy obracali się przeważnie w świecie nieeuklidesowym, przed którym wyobraźnia cofa się i bez potężnej pomocy analizy matematycznej zupełnie dokładnego pojęcia o przedmiocie niepodobna uzyskać. Jednak przedsięwzięcie nie jest beznadziejne i czytelnik, zachowujący w pamięci główne wywody poprzedzające, nie powinien napotkać trudności pojęciowych nieprzezwyciężonych.

Mechanika klasyczna i specjalna teorja względności wyróżniają układ spółrzędnych, który nazwaliśmy inercyjnym. Z wielkiem przybliżeniem układ spółrzędnych astronomiczny, nieruchomy względem gwiazd, jest układem inercyjnym. Prawa ruchów, i w ogólności prawa przyrody, przybierają postać najprostszą według mechaniki klasycznej i specjalnej teorji względności, jeżeli je odniesiemy do inercyjnego układu spółrzędnych. Naprz. pozostawiony sobie punkt materjalny znajduje się względem tego układu albo w spoczynku albo w ruchu prostolinjowym i jednostajnym. Układ inercyjny jednak nie jest jednoznacznie określony: wszystkie układy spółrzędnych, poruszające się względem inercyjnego ruchem jednostajnym i prostolinjowym, zachowują jego własności, to znaczy mogą być uważane za inercyjne. Różnica pomiędzy mechaniką klasyczną i specjalną teorją względności polega tylko na tem, że związek między przestrzenno - czasowemi miarami w dwu układach inercyjnych różni się w teorji względności od tego związku, który przyjmuje mechanika. Pierwszy związek nazwaliśmy przekształceniem Lorentza, drugi — przekształceniem Galileusza.

Jednak znajomość praw przyrody, odniesionych do układów inercyjnych, nie wystarcza. Naprz. ziemia znajduje się względem układu astronomicznego spółrzędnych w ruchu postępowym dokoła słońca, który zresztą w ciągu krótkiego czasu możemy rozpatrywać, jako jednostajny i prostolinjowy, oraz w ruchu obrotowym. Jakim zmianom ulegną prawa ruchów jeżeli je odniesiemy do obracającej się ziemi? Na to pytanie mechanika klasyczna daje odpowiedź, wprowadzając „pozorne siły".

Przypuśćmy, iż w pobliżu ziemi porusza się jakiekolwiek ciało, naprz. pocisk wystrzelony z działa. Gdy odnosimy ten ruch do układu inercyjnego, to znaczy rozpatrujemy, jak się on przedstawia obserwatorowi, znajdującemu się poza

ziemią i nieruchomemu względem gwiazd, wówczas powinniśmy założyć, iż na pocisk działa tylko siła rzeczywista, raczej siła, którą mechanika uważa za rzeczywistą, mianowicie siła przyciągania ziemi: dla uproszczenia możemy pominąć wpływ oporu powietrza. Skoro zaś pragniemy opisać ruch pocisku tak, jak się przedstawia obserwatorowi ziemskiemu, obracającemu się wraz z ziemią względem gwiazd, musimy obok siły przyciągania ziemskiego wprowadzić „pozorne" siły odśrodkowe, powstające, jak pospolicie się wyrażają, na skutek ruchu obrotowego ziemi. Bądź co bądź mechanika klasyczna podaje przepisy dokładne, które można zastosować do każdego przypadku.

Ograniczenie względności do ruchów prostolinjowych i jednostajnych wytwarzało stan rzeczy niezadowalający, albowiem trudno było znaleźć odpowiedź na niektóre kwestje, związane z ruchami przyśpieszonemi: przekonaliśmy się o tem, mowiąc o paradoksie zegarów w § 6. Einstein zdawał sobie sprawę z niedoskonałości swej teorji i wytężył usiłowania w celu usunięcia jej braków. Owocem tych usiłowań jest wszechobejmująca doktryna, nazywająca się ogólną teorją względności.

Myśl podstawowa tej teorji może być streszczona w następującem twierdzeniu: „Prawa zjawisk przyrody zachowują swą postać niezależnie od stanu ruchu układu, do którego rozważane prawa odnosimy". Później ogólną zasadę względsci sformułujemy w sposób zupełniejszy.

Innemi słowy, opis ruchów i zjawisk nie zależy od stanu ruchu układu, w którym je obserwujemy. Przeciwko tej zasadzie w brzmieniu podanem zdają się przemawać najpospolitsze doświadczenia mechaniczne. Wyobraźmy sobie, iż obserwator znajduje się w wagonie pociągu, który toczy się po szynach prostolinjowo i jednostajnie bez dostrzegalnych wstrząśnień. Żadne doświadczenia czynione z ciałami, mieszczą-

cemi się wewnątrz wagonu, nie wykażą obserwatorowi, czy jest w spoczynku, czy — w ruchu. Tego wymaga specjalna teorja względności i doświadczenie jest z nią w zgodzie.

Przypuśćmy teraz, że pociąg zaczyna swój bieg gwałtownie przyśpieszać: obserwator natychmiast stwierdzi, iż znajduje się w tym czasie w ruchu przyśpieszonym, ponieważ jakby niewidzialna siła odrzuca go w tył i wszystkie przedmioty wewnątrz wagonu mają dążność do poruszania się w tymże kierunku. Gdy przeciwnie pociąg zostaje gwałtownie hamowany, obserwator i przedmioty go otaczające otrzymają jakby pchnięcie naprzód.

Przytoczymy jeszcze doświadczenie Newtona, które on uważał za dowód tego, że istnieje bezwzględna przestrzeń i bezwzględny ruch w niej. Weźmy szklankę z wodą i, oplótłszy siatką, zawieśmy na sznurze pionowo. Powierzchnia wody w szklance jest płaska. Jeżeli obracając szklankę, skręcimy mocno sznur, jak to czynił Newton, i następnie puścimy, sznur zacznie się rozkręcać i szklanka zostaje wprawiona w szybki ruch obrotowy. Wtenczas powierzchnia wody zakrzywia się, przyczem pośrodku tworzy się zagłębienie, około ścian zaś woda wznosi się do góry. Pomiędzy stanami spoczynku i ruchu istnieje zatem konkretna różnica.

Ażeby uwolnić się od warunków ziemskich, w których ciążą na nas rozmaite przyzwyczajenia myślowe (naprz. mimowoli sądzimy, iż ruch względem ziemi jest bezwzględny), wyobraźmy sobie, iż obserwator jest umieszczony w kajucie statku, mogącego żeglować w próżni. Jeżeli statek jest w ruchu prostolinjowym i jednostajnym, zachowanie się ciał wewnątrz kajuty w niczem nie zdradza istnienia tego ruchu. Tylko obserwacja ciał zewnętrznych może pouczyć obserwatora, iż znajduje się względem nich w ruchu. Ale załóżmy, iż statek w pewnej chwili nabył ruchu obrotowego, albo własnemi środkami, albo naprz. znalazłszy się wewnątrz

atmosfery jakiegokolwiek ciała niebieskiego, w której istnieje ruch wirowy. Istnienie ruchu obrotowego natychmiast zdradzi się tem, że obserwator i wszystkie przedmioty w kajucie będą popychane ku ścianom kajuty siłą tym większą, im są dalej od osi obrotu, przechodzącej, dajmy na to, przez środek kajuty. Powiadamy, iż na części układu, znajdującego się w ruchu obrotowym, działają siły odśrodkowe. Mechanika klasyczna uważa je za siły pozorne, pochodzące stąd, że każde ciało mocą prawa bezwładności dąży do zachowania kierunku i prędkości, jakie ruch ciała w danej chwili posiada.

Bądź co bądź, wszystkie przytoczone przykłady zdają się wskazywać, że układy, znajdujące się względem siebie w ruchu przyspieszonym, nie są równoważne między sobą (ruchem przyśpieszonym jest każdy ruch oprócz prostolinjowego i jednostajnego). Dodam jeszcze, że ruch obrotowy ziemi ujawnia się w spłaszczeniu globu ziemskiego, które wywołują siły odśrodkowe. Wprawdzie już Mach uczynił słuszną uwagę, iż ruchu obrotowego, naprz. ziemi, niema powodu uważać za bezwzględny: jest to ruch względem gwiazd, nie zaś w przestrzeni rzekomo bezwzględnej. Różnica jednak w zachowaniu się ciał, gdy ruch, w którym biorą udział, staje się przyśpieszonym, jest faktem niezaprzeczonym.

Einstein osiągnął równoważność układów poruszających się w dowolny sposób przez wprowadzenie pola grawitacyjnego, pojętego jako własność przestrzeni. W związku z tem ogólna teorja względności jest zarazem teorją grawitacji czyli ciążenia powszechnego. Prawo grawitacji głosi, że wszystkie ciała oddziaływają na się siłą, która, jeżeli weźmiemy na uwagę małe cząstki ciał, jest proporcjonalna do mas i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości uważanych cząstek. Dokoła każdego ciała, naprz. ziemi rozpościera się, jak powiadamy, pole grawitacyjne. Z pomocą tego terminu

właściwie wyrażamy fakt, że ciało próbne, mające, dajmy na to, masę jednego grama, jeśli je umieścimy gdziekolwiek w przestrzeni otaczającej ziemię, podlega działaniu siły przyciągania, skierowanej w przybliżeniu ku środkowi ziemi.

Pod wpływem siły przyciągania ziemskiego zachodzi spadanie ciał w pobliżu powierzchni ziemi, fakt codziennego doświadczenia. Jest rzeczą uderzającą, iż wszystkie ciała, jakiebykolwiek były ich własności fizyczne i chemiczne, spadają w próżni jednakowo, z tem samem stałem przyśpieszeniem. Prawo to, odkryte przez Galileusza, zapoczątkowało niejako nowożytny rozwój fizyki. Jednakże na pytanie, dlaczego ciała przyrody, tak różniące się między sobą pod innemi względami, jednakowo spadają, nie umiano dotychczas dać żadnej odpowiedzi.

Jeżeli sceptyk może mieć zastrzeżenia co do opinji, jakoby teorja Eisteina rozwiązała zagadkę grawitacji, to nie ulega wątpliwości, że na gruncie tej teorji przyczyna jednakowego spadania ciał w polu grawitacyjnem staje się jasną. Największe zdobycze ideowe fizyka osiągała wówczas, gdy udawało się połączyć odrębne klasy zjawisk. Teorja Einsteina łączy grawitację i bezwładność, wychodząc z faktu, że wszystkie ciała nabywają jednakowego przyśpieszenia zarówno pod wpływem ciążenia powszechnego, jak pod wpływem sił odśrodkowych, które są skutkiem bezwładności i przez mechanikę klasyczną były uważane jako siły pozorne.

Wyobraźmy naprz. większych rozmiarów krążek, na którym są umieszczone rozmaitych rozmiarów przedmioty. Jeżeli wprawimy krążek w szybki ruch obrotowy, te przedmioty będą podlegać działaniu sił odśrodkowych, popychających je ku obwodowi krążka Otóż prędkości nabyte przez ciała umieszczone w równej odległości od środka krążka, będą jednakowe, niezależne od natury ciał (zakładamy, że

oś obrotu jest prostopadła do płaszczyzny krążka i przechodzi przez jego środek).

Ta analogja między objawami grawitacji i bezwładności jest dla Einsteina dowodem tożsamości ich natury. Najkrócej teorja grawitacji Einsteina streszcza się w zdaniu: grawitacja i bezwładność są identyczne. Postarajmy się tę myśl rozwinąć i uprzystępnić, o ile to się da zrobić bez pomocy analizy matematycznej.

§ 11. Teorja grawitacji Einsteina. Pola grawitacyjne „rzeczywiste".

Najpierw zobaczmy, jak Einstein tłumaczy ciążenie powszechne w odniesieniu do układu inercyjnego spółrzędnych, podstawowego w mechanice klasycznej. Zakładamy więc, iż wszystkie ruchy mają być odnoszone do układu astronomicznego nieruchomego względem gwiazd. Wiemy dobrze, jakim jest względem tego układu ruch jakiegokolwiek ciała mocą bezwładności, to znaczy, gdy ciało jest pozostawione sobie, nie znajduje się pod wpływem sił zewnętrznych, w szczególności sił ciążenia powszechnego. Ciało wtedy wykonywa ruch prostolinjowy i jednostajny. Warunek powyższy w przybliżeniu spełnia ciało, znajdujące się w znacznem oddaleniu od wielkich ciał przyciągających takich, jak słońce, gwiazdy: w obszarach międzygwiazdowych grawitajca jest znikomo mała.

Inaczej rzecz się ma w pobliżu ogromnych skupień materji, jakiemi są ciała niebieskie: w obszarach je otaczających rozpościera się potężne pole grawitacyjne, w którem ruch ciał różni się jaskrawo od ruchu prostolinjowego i jednostajnego. Naprz. pod wpływem przyciągania słońca planety zakreślają tory zamknięte kształtu eliptycznego, zbliżonego zresztą do okręgu koła. Einstein twierdzi, że i ten ruch

odbywa się mocą bezwładności. Odstępstwo charakteru ruchu od typu najprostszego, jakim jest ruch prostolinjowy i jednostajny, tłumaczy się tem, że przestrzeń naokoło ciała niebieskiego traci charakter najprostszej przestrzeni euklidesowej i nabiera cech przestrzeni nieeuklidesowej. Własności zatem przestrzeni są uwarunkowane materją we wszechświecie rozmieszczoną; używając terminologji naukowej, powiemy, iż materja określa formę metryczną przestrzeni.

W przestrzeni nieeuklidesowej rolę linij prostych odgrywają linje geodetyczne, których kształt zależy od charakteru przestrzeni. Dokoła słońca tworzą się takie stosunki przestrzenno-czasowe, że linje geodetyczne, po których mocą bezwładności poruszają się planety, są elipsami (przy pewnych warunkach początkowych ruchu). Uogólnione prawo bezwładności brzmi: ciała pozostawione sobie poruszają się po linjach geodetycznych, różniących się od linji prostej w tych obszarach, gdzie istnieje pole grawitacyjne. Dwa zdania: „w danym obszarze przestrzeń różni się od euklidesowej przestrzeni" i „w danym obszarze istnieje pole grawitacyjne" wyrażają to samo.

W pewnym stopniu te stosunki można uzmysłowić z pomocą obrazu istot dwuwymiarowych, którym posługiwaliśmy się, mówiąc o przestrzeniach nieeuklidesowych. Trójwymiarowej przestrzeni euklidesowej odpowiada w dwu wymiarach płaszczyzna. Ciała niebieskie w tym obrazie zredukują się do krążków niezmiernie małych w porównaniu z odległościami je dzielącemi. Otóż w obszarach oddalonych od krążków — słońca, planet, gwiazd poszczególnych — powierzchnia, na której żyją nasze istoty, nie znające trzeciego wymiaru, nie różni się dostrzegalnie od płaszczyzny i ciało dwuwymiarowie pozostawione sobie odbywa ruch jednostajny po linji prostej. Inaczej układają się stosunki w pobliżu krążków: otaczająca je powierzchnia jest zakrzywiona i rolę

prostych obejmują linje geodetyczne, okrążające (w pewnych granicach prędkości ruchu) ciała niebieskie dwuwymiarowe, reprezentowane przez krążki. Ten obraz niedołężne tylko daje pojęcie o bogactwie stosunków, jakie panują w trójwymiarowej przestrzeni.

W rzeczywistości fizycznej rozmaitość jest jeszcze większa, albowiem ogólna teorja względności o wiele ściślej, aniżeli teorja specjalna, zespala czas, jako czwarty wymiar, z przestrzenią trójwymiarową. Mamy zatem świat fizyczny czterowymiarowy, w którym linje geodetyczne służą, jako tory ciał pozostawionych sobie, przyczem z torem jest nierozdzielnie związany czas. Tem się tłumaczy, że ciało puszczone swobodnie w pobliżu powierzchni ziemskiej, porusza się wprawdzie po linji prostej, ale ruchem jednostajnie przyśpieszonym. Ogólnym zaś torem geodetycznym w stałem polu grawitacyjnem, jakie mamy w niewielkich obszarach około ziemi, jest zwykła parabola, którą zakreśla ciało jakkolwiek rzucone, jeśli zaniedbamy wpływ powietrza.

Teraz fakt, że wszystkie ciała w próżni spadają jednakowo, albo, mówiąc ogólniej, że przyśpieszenie ruchu w polach grawitacyjnych nie zależy od natury ciał, staje się sam przez się zrozumiałym. Torem ciała swobodnego jest linja geodetyczna, której kształt zależy tylko od charakteru przestrzeni, otaczającej poruszające się ciało.

W związku z rozważaniami dotychczasowemi powinniśmy udzielić odpowiedzi na wątpliwość łatwo się nasuwającą. Skoro według Einsteina przestrzeń naokoło globu ziemskiego jest tak znacznie zmieniona, iż zamiast linij prostych ruch mocą bezwładności odbywa się po parabolach, niezrozumiałą wydaje się rzeczą, jakim sposobem geometrja euklidesowa tak doskonale odpowiada naszym doświadczeniom. Otóż analiza głębsza wykazuje, że wpływ krzywizny przestrzeni wybitnie przejawia się tylko w zmianie toru ciał

swobodnie poruszających się, na inne zjawiska i własności fizyko-chemiczne ciał ów wpływ jest niezmiernie mały, niedostrzegalny z pomocą zwykłych środków badawczych. Używając terminu chemicznego, powiemy, iż ruch mocą bezwładności jest najlepszym odczynnikiem na krzywiznę przestrzeni.

Punkt widzenia Einsteina na grawitację można jeszcze streścić w zdaniu: ciążenie powszechne nie jest właściwie siłą, jaką ciała przyrody na się oddziaływają, lecz jest bezpośrednim wynikiem własności geometrycznych przestrzeni. Działanie ciał na siebie następuje tylko przy zetknięciu i skutkiem własności elektromagnetycznych, przysługujących wszystkim ciałom. Fizyka spółczesna dąży do tego, ażeby wszystkie siły działające w materji sprowadzić do sił elektromagnetycznych. Widzimy, że w teorji Einsteinowskiej siła grawitacji zajmuje stanowisko odrębne, redukując się do cechy nierozłącznej z rozciągłością przestrzenno-czasową.

Dotychczas rozpatrywaliśmy ruchy ciał i pola grawitacyjne w odniesieniu do astronomicznego układu spółrzędnych. Charakter pola grawitacyjnego w tym układzie jest następujący: w oddaleniu od ciał kosmicznych grawitacja jest nikła i w związku z tem przestrzeń ma ze znacznem przybliżeniem cechy przestrzeni euklidesowej, w blizkiem zaś otoczeniu wielkich skupień materji rozciąga się pole grawitacyjne potężne i, co na to samo wychodzi, rozciągłość czterowymiarowa fizyczna nabiera cech nieeuklidesowych.

Nie rozstrzygnęliśmy jednak dwu zasadniczych kwestyj: po pierwsze, według jakiego prawa materja określa własności geometryczne przestrzenno-czasowe i wytwarza w ten sposób pole grawitacyjne? Po drugie, jaką rolę pole grawitacyjne odgrywa w ogólnym postulacie względności?

Gdybyśmy poprostu założyli, że siły grawitacyjne działają podług prawa Newtona odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu z odległości i dalej szukali, jakie stosunki prze-

strzenno-czasowe odpowiadają temu założeniu, wtedy nie mielibyśmy właściwie nowej teorji grawitacji, a raczej dowcipną parafrazę starej Newtonowskiej teorji. Nie moglibyśmy również twierdzić, że nowa teorja tłumaczy grawitację. Nad tem, co oznacza pojęcie „tłumaczyć" we fizyce, można byłoby wiele dyskutować, przeto, aby nie odbiegć od przedmiotu, wystarczy dla naszych celów następujące określenie, którego ogólności nie przesądzam: wytłumaczyć jakąkolwiek grupę zjawisk jest to wyprowadzić prawa nią rządzące z przyjętej uprzednio ogólnej zasady.

Einstein właśnie okazał, że prawa pól grawitacyjnych mogą być uzyskane z ogólnego postulatu względności. Wywód Einsteina nie idzie jednak drogą czystej dedukcji, ma raczej charakter indukcyjny. Ogólne prawo grawitacji otrzymuje się przez zbadanie pól grawitacyjnych, które z dużem zresztą zastrzeżeniem można nazywać sztucznemi lub pozornemi. Zauważę nawiasem, że przejście do pól ogólnych nie odbywa się bez hipotez, opartych na postulacie prostoty: śród możliwych rozwiązań wybiera się to, które jest najprostsze.

§ 12. Zasada równoważności. Pola grawitacyjne „pozorne".

Łącznikiem między grawitacją a ogólnym postulatem względności jest tak zwana zasada równoważności. Wyobraźmy sobie teraz, że odnosimy rozmaite ruchy i zjawiska we wszechświecie do układów spółrzędnych, poruszających się w dowolny sposób względem układu astronomicznego. Zasada równoważności głosi: zmiany jakie zachodzą w przebiegu zjawisk, gdy układ spółrzędnych, do którego odnosimy zjawiska, znajduje się w ruchu przyśpieszonym względem układu inercyjnego, są równoważne działaniu grawitacji. Co mamy przez to rozumieć, najlepiej wytłumaczą przykłady.

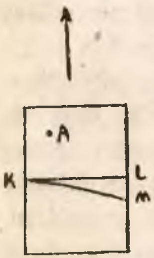
Przypuśćmy, iż rozporządzamy owym statkiem, który może poruszać się w próżni międzygwiazdowej. Nazwijmy go statkiem planetarnym, ponieważ w nim możnaby podróżować z jednej planety na drugą. Niech statek ze swą załogą szybuje w jakimś regionie przestrzeni. W zamkniętej kajucie wewnątrz statku znajduje się obserwator, interpretujący zjawiska przez niego postrzegane z naukowego punktu widzenia. W pewnym czasie zauważa on, iż wszystkie ciała i on sam utraciły ciężar.

Przedmiot rzucony w jakimkolwiek kierunku porusza się jednostajnie po linji prostej, póki nie zderzy się z innym przedmiotem lub ścianą. Wszystko, co nie powinno ruszać się z miejsca, musi być przymocowane do podłogi lub ścian, inaczej łatwo stać się może, iż szafa oddzieli się od podłogi i popłynie ku sufitowi. Zresztą żadna katastrofa stąd nie wyniknie: lekkie pchnięcie zawróci ją na miejsce. Dalej przedmiot, który obserwator upuści z ręki, nie popychając w żadnym kierunku, pozostaje zawieszony w powietrzu. „Aha", powie obserwator, „wiem, co to wszystko znaczy: statek nasz leci ruchem jednostajnym i przyśpieszonym i znajduje się w regionie przestrzeni, oddalonym od większych ciał niebieskich, t. j. tam, gdzie pole grawitacyjne jest znikomo małe'.

Potem obserwator udał się, dajmy na to, na dłuższy spoczynek i po obudzeniu się konstatuje, że stosunki uległy zmianie radykalnej. On sam i przedmioty wokoło mają ciężar, który je mocno przyciska do podłogi, przedmiot rzucony spada na podłogę, zakreślając parabolę. Jeśli przedmiot został upuszczony z ręki bez początkowej prędkości, spada on ruchem jednostajnie przyśpieszonym. Czy teraz obserwator, nie wyglądając nazewnątrz, jest w stanie rozstrzygnąć, co się dzieje ze statkiem? Odpowiedź wypada przecząca, ponieważ są dwie możliwości. Pierwsza możli-

wość: statek wciąż znajduje się daleko od ciał przyciągających, ale porusza się ruchem jednostajnie przyśpieszonym (w kierunku od podłogi ku sufitowi kajuty); druga możliwość: statek spoczywa na powierzchni jakiegokolwiek ciała niebieskiego i jest w polu grawitacyjnem, ulegając przyciąganiu tego ciała, albo leci w pobliżu jego powierzchni, jak aeroplan, prostolinjowo i jednostajnie.

Łatwo sobie zdać sprawę z tego, że pierwsze przypuszczenie prowadzi do tych samych skutków, co drugie. Niech obserwator puszcza z ręki przedmiot A (rys. 10), nie popychając go: na skutek ruchu przyśpieszonego statku w kierunku strzałki podłoga zbliża się ku przedmiotowi, mając przyśpieszenie stałe; obserwator ruchu statku nie zauważa, przeto, odnosząc położenie i ruchy przedmiotów do ścian swej kajuty, powie, że przedmiot upuszczony spada na podłogę tak, jak spadają ciała u powierzchni ziemi. Poruszając się do góry ruchem przyśpieszonym, podłoga wywiera ciśnienie na nogi obserwatora i jego przeciw działanie równe i przeciwnie skierowane, zgodnie z trzeciem prawem Newtona, zastępuje ciężar ciała obserwatora. Oczywiście, że wszystkie ciała spadają jednakowo, jak w polu grawitacyjnem.



Rys. 10.

Zauważę, iż statek, znajdując się w ruchu przyśpieszonym, winien być tak obrócony względem kierunku ruchu, ażeby przedmioty miały dążność do spadania na podłogę, nie zaś na sufit kajuty. Powtarzam znów, że można podać zasadę statku, zdolnego do ruchu w pustce i do zmiany dowolnej kierunku ruchu, lubo, oczywiście, o zrealizowaniu go, przynajmniej obecnie, niema mowy.

Wniosek, jaki nasuwa przykład przytoczony, jest taki: układ, znajdujący się w ruchu jednostajnie przyśpieszonym

i układ, w którym panuje pole grawitacyjne o stałem natężeniu, są równoważne. Innemi słowy: jeżeli dany układ porusza się względem układu inercyjnego ruchem jednostajnie przyśpieszonym, to z punktu widzenia obserwatora spoczywającego w układzie inercyjnym pola grawitacyjnego niema, lecz ruch jest przyśpieszony, z punktu zaś widzenia obserwatora biorącego udział w ruchu układu, w nim panuje stałe pole grawitacyjne. Oba punkty widzenia są równouprawnione.

Einstein odwraca powyższe twierdzenie: przebieg zjawisk w stałem polu grawitacyjnem jest taki sam, jaki odbywa się wtedy, gdy pola grawitacyjnego niema, lecz układ, do którego odnosimy zjawiska, porusza się ze stałem przyśpieszeniem.

Nie należy mniemać, jakoby tu było tylko niepotrzebne nazywanie tej samej rzeczy dwoma imionami. Przykład ważny w teorji względności wyjaśni, że tak nie jest. Gdyby jeszcze dwadzieścia lat temu zapytano fizyka, czy promień światła ulega przyciąganiu, powiedzmy, słońca, odpowiedziałby, że niema podstaw do przypuszczenia, aby tego rodzaju działanie zachodziło. Otóż teorja względności przewiduje, że pole grawitacyjne działa na światło. Istotnie, w myśl zasady równoważności, zachowanie się promienia światła w stałem polu grawitacyjnem powinno być identyczne z jego zachowaniem się względem układu, znajdującego się w ruchu jednostajnie przyśpieszonym. Wystawmy sobie zatem, iż kajutę statku planetarnego przecina promień światła *KL* w kierunku poziomym (rys. 10): w czasie przebiegu światła od *K* do *L*, podłoga, na której stoi obserwator, zbliży się ku promieniowi, czyli względem poruszającego się obserwatora promień nie zakreśli prostej *KL*, lecz linję *KM* zlekka zakrzywioną. Stąd wnioskujemy, że i w polach grawitacyjnych, naprz. ziemi i słońca, musi zachodzić to samo. Jeśli uwzględnimy, iż ciało swobodnie puszczone spada u po-

wierzchni ziemi w ciągu pierwszej sekundy o niespełna pięć metrów, gdy światło przebiega w tym czasie 300.000 km., łatwo spostrzeżemy, że zakrzywienie promienia podczas przebiegu nawet w pobliżu słońca, gdzie ciążenie jest 27 razy większe, aniżeli na ziemi, będzie nadzwyczaj małe. Udało się je jednak wykryć i zmierzyć.

Zapoznamy się jeszcze z drugim ważnym przykładem na „pozorne" pole grawitacyjne. Można urządzić statek planetarny tak, żeby dał się wprawić w szybki ruch obrotowy. Przypuśćmy, iż w danej chwili to uczyniono i obrót odbywa się około osi prostopadłej do podłogi kajuty w jej środku. Obserwator konstatuje, że wszystkie przedmioty są jakby popychane na zewnątrz w kierunku linij prostopadłych do osi obrotu. Ogólna teorja względności to zachowanie się ciał tłumaczy w sposób dwojaki: odnośnie do układu inercyjnego statek znajduje się w ruchu obrotowym i ruch ciał od osi jest skutkiem dążności do utrzymania mocą bezwładności pierwotnego kierunku ruchu; względem zaś układu biorącego udział w ruchu obrotowym, ten ruch oczywiście nie istnieje (nie zauważamy bezpośrednio dziennego obrotu ziemi), ale istnieje pole grawitacyjne swoistego rodzaju, które wywiera siły, nazywane w mechanice klasycznej odśrodkowemi. Warto zaznaczyć, że „odśrodkowe" pole grawitacyjne jest niemożliwe w mechanice Newtona, to znaczy nie da się pomyśleć rozmieszczenia mas, któreby wytworzyło tego rodzaju pole. Widzimy, że teorje grawitacji Newtona i Einsteina głęboko się różnią.

Nie trudno przekonać się, że w polu rozważanem geometrja euklidesowa traci zastosowanie, co, jak widzieliśmy, jest związane z istotą grawitacji. Obserwator, w celu sprawdzenia tego stanu rzeczy, może wykonać pomiary długości i czasu sposobem następującym: ze środka leżącego na osi obrotu zakreśla on okręg koła na doskonale płaskiej powierzchni

prostopadłej do osi. Następnie z pomocą podziałki wymierza długość okręgu koła i jego średnicy. Geometrja euklidesowa wymaga, ażeby stosunek ten był równy liczbie π. Czy to wymaganie będzie spełnione w układzie wirującym? Podczas pomiaru okręgu podziałka zawsze jest układana w kierunku ruchu i ulega skróceniu na zasadzie wniosku, wyprowadzonego w § 6 ze wzorów na przekształcenie Lorentza. Mierząc krótszą podziałką, otrzymamy większą liczbę na długość okręgu. Na pomiar średnicy ruch układu nie wpływa, albowiem sztaba położona wzdłuż promienia jest prostopadła do kierunku ruchu obrotowego. Iloraz liczb otrzymanych w pierwszym i drugim pomiarze jest większy od π wbrew geometrji euklidesowej.

Również są zburzone podstawy, na których opierają się pomiary czasu. W rzeczy samej dwa jednakowe zegary, z których jeden jest umieszczony we środku, drugi — w innem miejscu, nie idą zgodnie, ponieważ drugi zegar porusza się z prędkością tem większą, im dalej znajduje się od środka. Zegar w ruchu, jak widzieliśmy, ma chód powolniejszy: zatem drugi zegar wciąż się spóźnia względem pierwszego. Względność przestrzeni i czasu występuje tu w całej pełni.

Zobaczmy jeszcze, jak w świetle tych nowych pojęć wygląda zjawisko, zachodzące podczas nagłego hamowania pociągu. Znów można ustalić dwa równoważne punkty widzenia: albo odniesiemy zjawisko do układu związanego z ziemią: wtedy powiemy, że pchnięcie naprzód, jakie otrzymują przedmioty i osoby w chwili zahamowania, jest skutkiem bezwładności, ujawniającej się podczas ruchu opóźnionego; albo odniesiemy to samo zjawisko do układu związanego niezmiennie z pociągiem, i wówczas uważamy, że w czasie hamowania powstaje w całej przestrzeni pole grawitacyjne, które oddziaływa na wszystkie ciała w kierunku ruchu pociągu. Tarcie hamulców stawia opór sile grawitacji.

dzięki czemu pociąg zatrzymuje się, podczas gdy cały świat nazewnątrz i przedmioty wewnątrz pociągu, o ile nie są dobrze umocowane, lecą naprzód, „spadają“ w polu grawitacji. Jedno tłumaczenie jest według Einsteina tak samo poprawne, jak drugie.

Pola grawitacyjne „pozorne“, których przykłady przytoczyliśmy, mogą być zniesione przez odpowiedni dobór układów odniesienia. Jest to samo przez się zrozumiałe. ponieważ pola pozorne powstają skutkiem ruchu jednych układów względem drugich. Naprz., jeżeli w układzie inercyjnym porusza się drugi układ ruchem jednostajnie przyśpieszonym, to, jak widzieliśmy, w tym drugim układzie istnieje stałe pole grawitacyjne, mające kierunek wprost przeciwny względem kierunku ruchu układu. Jeżeli wyobrazimy, iż w tym przeciwnym kierunku porusza się trzeci układ takim samym ruchem względem drugiego, jak drugi układ — względem pierwszego, to w trzecim układzie pole grawitacyjne będzie zniesione, ponieważ trzeci układ jest identyczny z pierwszym, inercyjnym układem.

Zatem stałe pole grawitacyjne około powierzchni ziemskiej będzie zniesione w układzie, który spada na ziemię z przyśpieszeniem stałem równem przyśpieszeniu ciężkości, to znaczy tak, jak ciało swobodnie spadające.

„Rzeczywiste“ pola grawitacyjne, których byt jest związany z istnieniem materji, wogóle nie mogą w całej rozciągłości zniknąć dzięki odpowiednim doborom poruszających się układów spółrzędnych. Więc naprz. pola grawitacyjnego ziemi niepodobna znieść wszędzie przez wprowadzenie układu, mającego określony ruch przyśpieszony, z czego łatwo zdamy sprawę, jeżeli uwzględnimy, że linje sił, wzdłuż których działa przyciąganie ziemi, rozchodzą się promienisto ze środka ziemi. Układ spółrzędnych nie może jednocześnie posiadać przyśpieszenia we wszystkich kierunkach.

§ 13. Niezależność praw przyrody od stosunków przestrzenno-czasowych.

Przy ustanawianiu ogólnych praw, rządzących polami grawitacyjnemi, Einstein zakłada, że w granicach nieskończenie małego obszaru można zawsze przez odpowiedni dobór układu spółrzędnych znieść pole grawitacji. W rzeczywistości te obszary mogą mieć znaczne rozmiary. Układ spółrzędnych, odpowiadający temu warunkowi, będzie układem inercyjnym wraz z wszystkiemi układami, które względem niego są w ruchu jednostajnym i prostolinjowym. Do układów inercyjnych stosuje się specjalna teorja względności. Dalej zakładamy, że prawa zjawisk fizycznych są znane w odniesieniu do układów inercyjnych, naprz. układu astronomicznego w oddaleniu od ciał wielkich rozmiarów. Stąd drogą analizy matematycznej wyprowadzimy prawa tychże zjawisk odnośnie do układów jakkolwiek poruszających się, przyczem powstają „pozorne“ pola grawitacyjne. W ten sposób poznajemy w szczególnych przypadkach prawa grawitacji i wpływ jej na rozmaite zjawiska, jak to wyjaśniliśmy, nie posługując się rachunkiem, w dwu przypadkach, poddanych wyżej dyskusji, przyczem ujawnił się wpływ pola grawitacyjnego na ruch światła.

Tą drogą idąc, Einstein znajduje prawo, obejmujące wszystkie „pozorne“ pola grawitacji. Podstawą rachunku jest wyrażenie na odstęp dwu nieskończenie bliskich punktów w czterowymiarowej przestrzenno-czasowej rozciągłości, czyli świecie fizycznym. Odstęp, o którym mowa, łączy odległość dwu zdarzeń w przestrzeni z odstępem w czasie; w układzie inercyjnym można go znaleźć z pomocą pomiarów długości i czasu, posługując się podziałkami sztywnemi i zegarami, uregulowanemi tak, jak uczy specjalna teorja względności. Odstęp dwu zdarzeń elementarnych pozostaje niezmieniony

we wszystkich innych układach spółrzędnych. Wzór matematyczny nań nazywają często uogólnionem twierdzeniem Pytagorasa.

Uzyskanie prawa, rządzącego wszystkiemi polami grawitacyjnemi, zarówno „pozornemi“ jak „rzeczywistemi“, wymaga nowego uogólnienia, które Einstein opiera na trzech postulatach: 1-o prawo ogólne powinno zadość czynić ogólnemu postulatowi względności; 2-o pole grawitacyjne zależy tylko od masy ciał przyrody, raczej od energji, ponieważ, jak widzieliśmy, masa jest zależna od energji, która jest pojęciem ogólniejszem; 3-o materja i pole grawitacyjne razem wzięte spełniają dwa główne fizyczne prawa zachowania, — prawo zachowania energji i prawo zachowania pędu (ilości ruchu).

Droga dedukcyj matematycznych, prowadzących do wzorów ogólnej teorji względności, nie jest łatwa i sam Einstein przy pokonywaniu trudności korzystał ze współpracy matematyka szwajcarskiego Grossmanna.

Rolę głównego narzędzia matematycznego odgrywa tak zwany rachunek tensorów w przestrzeniach ogólnych Riemanna.

Wypada jeszcze zaznaczyć, że jedną z nici przewodnich dedukcji było dążenie do uzyskania wzorów teorji w postaci, która, przy założeniach upraszczających, dałaby się uzgodnić z Newtonowskiem prawem ciążenia powszechnego.

Omawiając stosunki przestrzenno-czasowe w układzie obracającym się około osi, stwierdziliśmy, iż chód zegarów zależy od położenia i nie da się uzgodnić, podziałki zaś, służące do mierzenia długości, mają też długość rozmaitą, zależną od położenia w układzie i orjentacji względem kierunku ruchu. Zegary idą tem powolniej, podziałki, ułożone w kierunku ruchu, skracają się tem bardziej, im dalej znajdują się od osi obrotu, podczas, gdy podziałki zwrócone ku osi zachowują stałą długość.

Ten przykład okazuje, że w polu grawitacyjnem, albo, co na to samo wychodzi, w przestrzenno-czasowej rozciągłości ogólnej teorji względności niepodobna wogóle określić stałych miar długości i czasu. Przypominamy, iż w specjalnej teorji względności każdy układ miał swoje oznaczone miary.

Dalej w myśl ogólnej względności wszystkie układy odniesienia są równouprawnione, prawa zjawisk nie zmieniają się, gdy przechodzimy od jednego układu do drugiego, podlegają zmianie tylko stosunki przestrzenno czasowe, co się wyraża w powstawaniu pól grawitacyjnych. Stąd nieuchronnie wypływa wniosek, iż w stosunkach przestrzenno-czasowych nie zawiera się nic określonego i stałego, albo, mówiąc słowami Einsteina, ogólna teorja względności pozbawia czas i przestrzeń resztek przedmiotowości fizycznej.

Z każdem zjawiskiem punktowem czyli elementarnem w świecie zewnętrznem są związane cztery liczby, które wogóle znaczenia fizycznego nie mają i tylko w ograniczonym, chociaż rozległym zakresie, mogą być w przybliżeniu określone jako spółrzędne przestrzenne i czas. Te liczby są często nazywane spółrzędnemi Gaussa. Właściwie służą one do tego, ażeby odróżnić jedno zdarzenie od drugiego.

Einstein uważa, iż ten wynik teorji oddaje wiernie istotę naszego doświadczenia. Wszystkie obserwacje i pomiary sprowadzają się do konstatowania koincydencyj, współzdarzeń, jeśli mi wolno będzie ten termin polski wprowadzić. Przez współzdarzenie rozumieć będziemy spotkanie dwu zdarzeń w czasie i przestrzeni. Naprz. pomiar długości polega na tem, że odczytujemy położenia końców danej długości z pomocą podziałki, to znaczy konstatujemy zlewanie się końców z określonemi kreskami na podziałce. Dokładny pomiar czasu, dajmy na to przechodzenia gwiazdy przez południk, jest to współzdarzenie pojawienia się obrazu gwiazdy na nici ocznej lunety odpowiednio ustawionej i oznaczonego

uderzenia zegara, bijącego sekundy. Współzdarzeniom zjawisk elementarnych odpowiada równość liczb, podporządkowanych tym zjawiskom. Ta równość nie będzie naruszona, jeżeli zamiast jednych liczb wprowadzimy inne, związane z pierwszemi określonemi zależnościami.

Oznaczmy wspomniane liczby przez x_1, x_2, x_3, x_4; jeżeli zamiast ich użyjemy do opisu zjawisk nowych liczb x'_1, x'_2, x'_3, x'_4, które są funkcjami pierwszych: $x'_1 = f_1(x_1, x_2, x_3, x_4)$, $x'_2 = f_2(x_1, x_2, x_3, x_4)$, $x'_3 = f_3(x_1, x_2, x_3, x_4)$, $x'_4 = f_4(x_1, x_2, x_3, x_4)$, wtedy, skoro dwa zjawiska spotykają się, to jest mają równe x_1, x_2, x_3, x_4, odpowiednie wartości na x'_1, x'_2, x'_3, x'_4 też będą równe. Funkcje f powinny spełniać pewne warunki regularności.

Niema powodu, abyśmy jednej grupie liczb oddawali pierwszeństwo przed inną. Temu równouprawnieniu zadość czyni teorja względności, ustanawiając wzory, rządzące zjawiskami i niezależne od wyboru liczb, które wyznaczają zjawiska, czyli grają rolę spółrzędnych.

W ostatecznej zatem konsekwencji ogólna teorja względności uniezależnia prawa przyrody w tym zakresie, jaki obejmuje fizyka, od stosunków przestrzeni i czasu.

§ 14. Dyskusja nad niektóremi twierdzeniami teorji. Zagadnienie eteru.

Wykład podstaw ideowych teorji względności jest właściwie zakończony. Pozostaje jednak do omówienia szereg kwestyj, pominięcie których wytworzyłoby lukę niepożądaną. Zrozumiałą jest rzeczą, iż teorja tak osobliwa i trudna dała powód do rozmaitych nieporozumień. Powiemy najpierw o nich słów kilka.

Już była mowa w § 6 o paradoksie zegarów. Jeden

z dwu obserwatorów *A* i *B*, mianowicie *A* przebywa w spoczynku w układzie inercyjnym; drugi obserwator *B* rozpoczyna ruch z tego samego miejsca, gdzie jest *A*, porusza się przez pewien czas ruchem jednostajnym i prostolinjowym, zatrzymuje się i wraca do punktu wyjścia. Zegar tego obserwatora okaże się spóźnionym względem zegara *A*. Otóż można przypuścić, że obserwator *B* jest w spoczynku, zaś *A* jest w ruchu: wydawałoby się wówczas, że zegar *A* spóźni się względem *B*, co jest niedorzecznością, albowiem dwa zegary nie mogą równocześnie spóźnić się względem siebie.

Rozwiązanie tego paradoksu jes następujące. Zasada równoważności układów odniesienia w teorji względności bynajmniej nie oznacza, że układy te nie różnią się między sobą. Układ związany z obserwatorem *A* jest inercyjny, to znaczy w nim niema pola grawitacyjnego („pozornego"); tymczasem w układzie obserwatora *B*, uważanym za spoczywający, trzy razy pojawia się pole grawitacyjne. Jeśli dla lepszego uzmysłowienia rzeczy przypuścimy, że *B* odbywa swą podróż tędy i z powrotem koleją, to pole grawitacyjne działa raz w czasie, gdy pociąg rusza, nabierając rozpędu, drugi raz w czasie, kiedy pociąg zatrzymuje się u kresu swej drogi i rusza z powrotem, i poraz trzeci podczas zatrzymywania się pociągu w miejscu, skąd odjechał w podróż. We wszystkich trzech wskazanych okresach czasu ruch pociągu jest przyśpieszony albo opóźniony względem układu inercyjnego. Rachunek, oparty na teorji względności, poucza, że w okresie drugim pole grawitacyine sprawi z punktu widzenia obserwatora *B* tak szybki ruch zegara *A*, że opóźnienie, wywołane ruchem jednostajnym i prostolinjowym w międzyczasach trzech wskazanych okresów, będzie dokładnie skompensowane.

Teraz zabierze głos sceptyk: czy te pola grawitacyjne, o których mowa była przed chwilą i w § 12, nie są w rzeczywistości fikcją? Czy da się pomyśleć, ażeby zmiana układu

odniesienia była przyczyną pojawienia się sił grawitacji? Pomimo, iż wyżej nazywaliśmy pola tego rodzaju „pozornemi“ dla odróżnienia od pól „rzeczywistych“, otaczających materję w układzie inercyjnym, stwierdzamy, iż w pojęciu samego Einsteina istotnej różnicy między obu rodzajami pól niema.

Dla obserwatora podróżującego w statku planetarnym istnieją pola grawitacyjne w dwu przypadkach: po pierwsze, gdy obserwator porusza się zdala od ciał niebieskich ruchem przyśpieszonym, po drugie, gdy jest w pobliżu jednego z tych ciał w spoczynku, albo w ruchu prostolinjowym i jednostajnym. Oba przypadki w swych skutkach niczem się nie różnią. Lejtmotywem naszych rozważań była sentencja metodologiczna: to, czego stwierdzić nie można, nie istnieje. Skoro różnicy między polami „pozornemi“ i „rzeczywistemi“ nie da się skonstatować, są one w istocie swej identyczne, będąc skutkiem stosunków przestrzenno-czasowych w obu przypadkach jednakowych lub podobnych.

Energja kinetyczna, powiada Einstein, jest wielkością, której nikt nie odmówi realności. Nie bacząc na to, na pytanie, jaką właściwie jest energja kinetyczna, powiedzmy, ziemi, niepodobna dać odpowiedzi, ponieważ musielibyśmy poznać prędkość ruchu ziemi w bezwzględnej nieruchomej przestrzeni Newtona, na co nie mamy sposobów nawet z punktu widzenia mechaniki Newtonowskiej. Energja kinetyczna zależy od układu odniesienia i naprz. dla nas, biorących udział w ruchu ziemi, jej energja kinetyczna jest równa zeru.

W podobny sposób zależą pola grawitacyjne od układów odniesienia. Nie wynika stąd, że przyczyną tych pól są układy spółrzędnych, które nie wytwarzają przecież energji kinetycznej. Pola grawitacyjne odnośnie naprz. do pociągu hamowanego lub statku planetarnego, znajdującego się w ruchu przyśpieszonym, są wytwarzane według Einsteina przez

wszystkie ciała wszechświata, względem których odbywa się ruch przyśpieszony.

Nieporozumienia powstawały również w związku z względnością ruchu obrotowego ziemi. Teorja względności twierdzi, że możemy uważać ziemię za nieruchomą, wprowadzając jednocześnie pole grawitacyjne (por. § 12), skutkiem którego występują tak zwane siły odśrodkowe, działające w całym wszechświecie. Tutaj nasuwa się refleksja, która w podręcznikach kosmografji figuruje na pierwszem miejscu na poparcie światopoglądu Kopernika. Odnośnie do nieruchomej ziemi—gwiazdy, znajdujące się w odległościach, na przebycie których światło zużywa lata, nawet setki lat, dokonywałyby całkowitych obrotów po okręgach kół w ciągu doby; ten ruch można uważać za rzeczywisty, ponieważ wszystkie układy spółrzędnych są równoważne. Teorja względności, przynajmniej w Einsteinowskiem ujęciu, nie cofa się przed tą konsekwencją.

W takim razie usłyszymy zarzut, że teorja względności przeczy sama sobie, albowiem gwiazdy zakreślając koła w ciągu doby, poruszałyby się z prędkością wielokrotnie przewyższającą prędkość światła, którą przecież teorja uważa za największą, za nieprzekraczalną granicę prędkości ciał przyrody.

Zarzut ten nie jest słuszny: prędkość światła jest stała tylko w układach inercyjnych, do których stosuje się specjalna teorja względności. W polach grawitacyjnych, wprowadzonych przez ogólną teorję, prędkość może przybierać wartości dowolne zależne od wielkości tak zwanych potencjałów grawitacyjnych. Pola grawitacyjne, istniejące w układzie nieruchomej ziemi, są tak potężne w olbrzymich od ziemi odległościach, że pod ich wpływem gwiazdy pędzą z tą zawrotną prędkością, jaka jest potrzebna, aby obrót odbył się w przeciągu doby. Wszędzie jednak prędkość światła jest największa, zachowuje swoją własność granicznej prędkości, której nawet nie mogą dosięgnąć ciała przyrody.

Nadmienię, iż Laue, znakomity teoretyk niemiecki i zwolennik teorji względności, uważa, iż nie można iść tak daleko i posługiwać się układem odniesienia, któryby w całej przestrzeni był sztywnie związany z obracającą się ziemią. Zamiast tego układu proponuje inny, którego [prędkość obrotowa zmniejsza się w miarę, jak oddalamy się od ziemi, osie tego układu nawijają się na się, jak kłębek nici.

Pozostawiając na stronie tę secesję, stwierdzamy, iż z punktu widzenia Einsteina mają rację zarówno Ptolemeusz, który uważał ziemię za nieruchomą we środku wszechświata, jak Kopernik, który ziemię poruszył i zatrzymał słońce i gwiazdy. Utrzymując, że wszystkie układy odniesienia są zasadniczo równouprawnione, teorja nie przesądza, czy każdy z nich jest jednakowo dogodny dla opisu danych zjawisk przyrody. System Kopernika jest prostszy i dogodniejszy i w tem znaczeniu zachowa swoje pierwszeństwo.

Pomimo wszystkiego, co tu powiedzieliśmy, wyda się niejednemu, że mechanika Newtona jest prostsza i naturalniejsza. Ażeby wzmocnić argumentację, przytoczę punkt wyjścia rozważań, uzasadniających teorję względności, w doskonałym wykładzie jej podstaw, ogłoszonym przez Einsteina w Annalen der Physik (49, 1916).

W mechanice klasycznej i w specjalnej teorji względności, powiada Einstein, tkwi brak (Mangel) epistemologiczny, który uwidoczni przykład następujący. Dwa ciała ciekłe unoszą się w przestrzeni, oddzielone od siebie ogromną odległością, tak, że można zaniedbać ich oddziaływanie wzajemne. Każde ciało względem obserwatora, znajdującego się na drugiem ciele, obraca się ze stałą prędkością kątową około linji, łączącej środki ciał.

Jedno ciało *A* ma kształt kulisty, drugie zaś *B* przybrało kształt elipsoidy obrotowej podobnie, jak ziemia. Co powie o tych ciałach mechanika klasyczna Newtona? Odpo-

wiedź łatwo sformułować: ciało *A* spoczywa w przestrzeni bezwzględnej, albo porusza się w niej prostolinjowo i jednostajnie, ciało zaś *B* wiruje w tej przestrzeni, dzięki czemu nastąpiło spłaszczenie.

Zdaniem Einsteina mechanika klasyczna podaje fikcyjne tłumaczenie: przestrzeń nie może być przyczyną konkretnego zjawiska — spłaszczenia ciała. Przyczynę należy upatrywać w tem, że ciało *B* jest w ruchu obrotowym względem wszystkich ciał wszechświata, albo, co na to samo wychodzi, w tem, że owe ciała obracają się względem *B*; ten ruch wywołuje siły odśrodkowe powodujące spłaszczenie ciała *B*. Gdyby istniały we wszechświecie tylko ciała *A* i *B*, spłaszczenie wcaleby nie zaszło.

Widzimy, że to rozumowanie, któremu Einstein przypisuje znaczenie decydujące, ma charakter wybitnie epistemologiczny.

Zasługuje w końcu na wzmiankę stara, lecz wiecznie nowa w fizyce kwestja eteru. Jest to, według pierwotnego określenia, ośrodek wypełniający wszechświat i służący jako podłoże zjawisk elektromagnetycznych. Specjalna teorja względności czyni zbędnym ów ośrodek, lecz w teorji ogólnej pojęciu eteru można wyznaczyć miejsce, nadając mu wprawdzie znaczenie zgoła odmienne.

Przestrzeń ogólnej teorji względności jest uzależniona od materji, która wytwarza pole grawitacyjne. W rzeczy samej istnienie pola grawitacyjnego jest związane z tem, że przestrzeń nabywa cech nieeuklidesowych. Potencjały grawitacyjne określają własności geometryczne przestrzeni. Stąd niechybnie wynika, że przestrzeń bez pola grawitacyjnego wogóle nie istnieje. Polu grawitacyjnemu nie da się odmówić cech rzeczywistości fizycznej. Możemy zatem ową przestrzeń fizyczną nierozłączną z ciążeniem powszechnem nazywać eterem. Jest to wszakże eter całkiem pozbawiony mater-

jalności. Jego części nie mogą wykonywać żadnych ruchów i nie posiadają żadnych własności, jakie my przypisujemy ciałom przyrody. Tutaj warto zaznaczyć, że już Kartezjusz, ojciec filozofji nowożytnej, wypowiedział myśl, że fizyczny byt ciał i geometryczny byt przestrzeni są ściśle ze sobą związane.

Fizyka spółczesna buduje materję z pra-atomów elektrycznych, dodatnich i ujemnych, zwanych elektronami. Same zaś elektrony możemy uważać, jako obszary w polu elektromagnetycznem, wyróżniające się tem, że w nich zbiegają się albo z nich rozchodzą się linje sił elektrycznych.

Obraz fizyczny świata, konkluduje Einstein, zna dwie pojęciowo zasadniczo odmienne, lubo przyczynowo związane wzajemnie rzeczywistości: eter grawitacyjny i pole elektromagnetyczne, albo, wyrażając się innemi słowami, przestrzeń i materję.

§ 15. Hipotezy kosmologiczne.

Każda wielka teorja fizyczna dążyła do tego, ażeby objąć w swych rozważaniach całość wszechświata. Ogólna teorja względności nie jest pod tym względem wyjątkiem, tem więcej, że, wprowadzając do fizyki geometrję nieeuklidesową, wysuwa samo przez się narzucające się zagadnienie. Przestrzeń nieeuklidesowa może być, zależnie od charakteru, nieskończona albo skończona. Wyżej podaliśmy przykłady przestrzeni nieograniczonych, mających jednak rozmiary skończone: takiemi są przestrzenie kulista i eliptyczna. Powstaje pytanie, czy na zasadzie danych fizycznych i astronomicznych, jakie posiadamy, można wytworzyć mniej lub więcej prawdopodobny pogląd na ogólny charakter przestrzeni, która wraz z materją stanowi świat fizyczny. Czy wszechświat jest nieskończony, czy przeciwnie, posiada rozmiary skończone?

Zgóry zaznaczam, że do rozstrzygnięcia pytania w ten

sposób postawionego zamało jest niezbędnych przesłanek, które można byłoby uważać za pewne. Laue w swym gruntownym wykładzie teorji względności wcale nie zajmuje się tą kwestją, poczytując, iż brak do tego danych. Wobec wszakże zainteresowania, jakie odnośne spekulacje wywołały, nie pominę ich zupełnie, ograniczając się do poglądu, któremu daje wyraz sam Einstein.

Dość dawno spostrzeżono, iż z Newtonowską teorją ciążenia powszechnego wiążą się trudności, gdy ją stosujemy do wszechświata. Wiadomo, że słońce ze swemi planetami wchodzi w skład olbrzymiego układu gwiazdowego zwanego drogą mleczną. Niektóre mgławice spiralne tworzą, prawdopodobnie, układy analogiczne. Granic świata gwiazdowego nie postrzegamy; naturalną przeto wydaje się myśl, że gwiazdy, zgruba rzecz biorąc, są rozsiane równomiernie w przestrzeni. Pokazuje się jednak, że, przy tem założeniu, prosty rachunek, oparty na prawie przyciągania odwrotnie proporcjalnego do kwadratu odległości, prowadzi do wniosków niedopuszczalnych, jeżeli przestrzeń jest nieskończona.

Istotnie, zatoczmy dokoła jakiegokolwiek punktu, jako środka, kulę: siła przyciągania w punktach powierzchni tej kuli musi wzrastać bezgranicznie w miarę tego, jak rośnie promień kuli*). Toby znaczyło, że siła ciążenia musi wszędzie mieć wielkość nieskończoną. Obstając zatem za bezwzględną dokładnością prawa Newtona, zmuszeni bylibyśmy przyjąć, że wszechświat posiada jakby środek i w miarę oddalania się od niego gęstość skupienia materji maleje, gwiazdy spotykają się coraz rzadziej. Świat ciał niebieskich byłby w takiem razie wyspą na oceanie nieskończonej prze-

*) Siła przyciągania w punkcie wewnątrz kuli jednorodnej, wypełnionej materją w sposób ciągły, jest proporcjonalna do odległości tego punktu od środka kuli.

strzeni. To wyobrażenie pociąga za sobą nowe trudności. Gwiazdy znajdują się w szybkim ruchu, który doprowadzi do tego, że każda gwiazda, znalazłszy się daleko od środka skupienia materji we wszechświecie, miałaby widoki oddalić się do niego na zawsze wobec bardzo słabego przyciągania, któremuby podlegała. Znaczy to, że gwiazdy w końcu roz proszyłyby się w nieskończoności. Tak samo promieniowanie gwiazd ginęłoby bez śladu w przestrzeni

Na te konsekwencje nie łatwo się zgodzić.

Teorja względności też nie doprowadza do wniosków zadowalających, jeżeli przyjmiemy, że przestrzeń jest nieskończona. Ale według tej teorji własności geometryczne przestrzeni są uzależnione od materji, która w postaci gwiazd jest rozmieszczona we wszechświecie. Einstein przypuścił w pierwszem przybliżeniu, że materja równomiernie napełnia wszechświat i jest w spoczynku. Jeżeli ktokolwiek powie, iż to założenie jest zupełnie niezgodne z rzeczywistością, można mu odpowiedzieć, że przecież wiele zagadnień, dotyczących gazów, możemy rozwiązywać w założeniu, iż gaz jest materją ciągłą podczas, gdy w rzeczywistości składa się z niezmiernie licznego zbiorowiska cząsteczek.

Wtedy przestrzeń, odpowiadająca wzorom teorji względności (wprawdzie nieco zmodyfikowanym), będzie miała charakter przestrzeni sferycznej, której własności charakterystyczne były opisane § 8. Wszechświat zatem jest zamknięty i skończony lubo niema granic.

Nierównomierność rozmieszczenia materji, która jest skupiona w gwiazdach, oddzielonych od siebie ogromnemi odległościami, powoduje lokalne odstępstwa od sferyczności przestrzeni. W dwu wymiarach przestrzeń trójwymiarową sferyczną reprezentuje powierzchnia kuli. Posługując się więc tym obrazem dwuwymiarowym, dostępnym wyobraźni, powiemy, iż przestrzeń wszechświata przypomina kulę, po-

krytą zmarszczkami, coś, jakby powierzchnię morza lekko sfalowaną. Zmarszczki przestrzeni odpowiadają miejscom, gdzie znajdują się gwiazdy.

Własności przestrzeni sferycznej prowadzą do wniosków ciekawych, dotyczących promieniowania gwiazd. Promienie światła wybiegające z gwiazdy jakiejkolwiek zakreślają linje geodetyczne, które spotkają się w punkcie przestrzeni przeciwległym względem punktu wyjścia: analogicznie na powierzchni kulistej okręgi wielkich kuli, poprowadzone z jakiegokolwiek punktu, przecinają się w punkcie przeciwległym. W tym punkcie tworzy się obraz gwiazdy, naśladujący gwiazdę rzeczywistą. Promienie światła, rozchodzące się z obrazu gwiazdy, znów powrócą do punktu wyjścia. Wolno więc byłoby przypuszczać, że gwiazdy, które oglądamy na niebie, są w znacznej części gwiazdami — widmami, rozumiejąc przez to obrazy gwiazd materjalnych.

Tworzeniu się tych gwiazd widmowych może zresztą przeszkodzić absorpcja promieniowania podczas jego przebiegu dzięki istnieniu w przestrzeni międzygwiazdowej pyłu oraz rozległych mgławic gazowych. Prócz tego zachodziłoby rozpraszanie promieni skutkiem lokalnych zmian krzywizny przestrzeni.

Relatywiści obliczają, iż promień słońca odbyłby podróż naokoło wszechświata mniej więcej w ciągu miljarda lat. Tak wielkie rozmiary ma nasz wszechświat dlatego, że przeciętna gęstość materji, w nim rozsianej, jest nadzwyczaj mała. Przez przeciętną gęstość rozumiemy stosunek sumy mas gwiazd, znajdujących się w jakimkolwiek wielkim obszarze, dajmy na to, w granicach drogi mlecznej, do objętości obszaru.

Im większa jest gęstość materji, tem większą musi być krzywizna przestrzeni i tem mniejsze będą jej rozmiary. Powierzchnia kuli ma tem mniejsze rozmiary, im większą jest jej krzywizna.

Możemy na gruncie teorji względności rozwiązać zadanie następującego rodzaju: jakie rozmiary posiadałby wszechświat, napełniony wodą o gęstości normalnej (odpowiadającej 4° C.)? Rachunek okazuje, że „promień" wszechświatowej przestrzeni sferycznej wynosiłby tedy tylko 570.000.000 km.; na przebycie tej drogi światło zużyłoby jakieś trzy kwadranse czasu. Ten ocean kosmiczny nie miałby środka ani granic: nic nie mogłoby doń przeniknąć, ani go opuścić, ponieważ poza nim nicby nie istniało.

§ 16. Sprawdzenie doświadczalne ogólnej teorji względności.

Mówiąc o teorji fizycznej, nie wolno pominąć pytania, jak dalece ją potwierdzają fakty. Fizyka jest nauką przyrodniczą, zatem doświadczenie decyduje ostatecznie o wartości teoryj fizycznych.

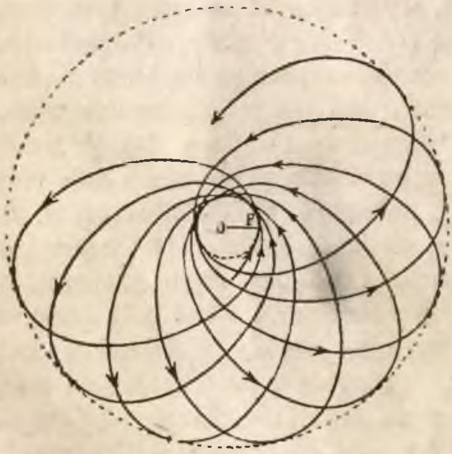
Jako pierwsze przybliżenie, z teorji względności wynikają prawa mechaniki Newtona i zarazem prawo ciążenia powszechnego, to znaczy siły przyciągającej, odwrotnie proporcjonalnej do kwadratu odległości. Zdawałoby się, że imponujący gmach mechaniki niebios, wzniesiony na tem prawie, świadczy równocześnie na korzyść teorji Einsteina. Przecież, z wyjątkiem nielicznych drobnych odstępstw jeszcze niewyjaśnionych, położenia wszystkich ciał układu słonecznego dają się przewidzieć ze zdumiewającą dokładnością na zasadzie tak prostego prawa Newtona.

Wniosek powyższy nie byłby jednak usprawiedliwiony. Wzory Einsteinowskiej teorji grawitacji mają charakter tak ogólny, że było łatwo, czyniąc założenia upraszczające, uzyskać zgodność z prawem Newtona.

Einsteinowi udało się jednak dostarczyć bezpośrednich

i nowych dowodów, popierających jego teorję. Tych słynnych dowodów liczy się trzy; zajmiemy się najpierw dowodem, opartym na ruchu Merkurego, najbliższej słońca planety w naszym układzie.

Gdyby Merkury znajdował się tylko pod wpływem przyciągania słońca, droga jego byłaby zgodnie z Keplerem, elipsą. Inne planety układu słonecznego sprawiają swojem



Rys. 11.

przyciąganiem zaburzenia w tym ruchu. Jeden rodzaj zaburzeń przejawia się w tem, że elipsa nie pozostaje nieruchomą w przestrzeni, lecz obraca się w swej płaszczyźnie dokoła słońca w tym samym kierunku, w jakim krąży po niej planeta.

Rysunek 11 uwidocznia charakter toru, który zakreśla Merkury, przyczem słońce znajduje się w punkcie *O*, ognisku obracającej się elipsy. Wszystkie punkty elipsy, a za-

tem i najbliższy słońca, tak zwany punkt przysłoneczny, uczestniczą w tym ruchu obrotowym. Wobec tego omawiane zaburzenie zwykle nazywa się ruchem obrotowym punktu przysłonecznego.

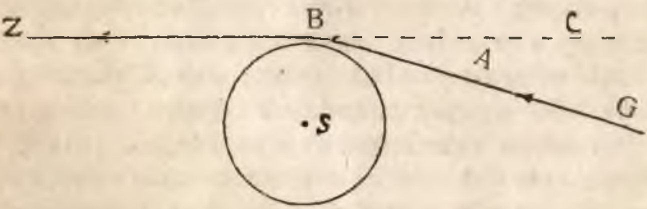
Rachunek wykazywał, że wpływ wszystkich planet powinien sprawiać obrót punktu przysłonecznego Merkurego wynoszący 532″ w ciągu stulecia. Tymczasem obserwacje dają liczbę większą, mianowicie 574″.

Różnica, wynosząca 42 sekundy łuku, pozostawała niewytłumaczoną (Le Verrier, 1859). Proponowano wprawdzie w tym celu rozmaite hipotezy, ale żadna nie była dostatecznie uzasadniona. Jest rzeczą istotnie uderzającą, iż ten ruch wyprowadza się z teorji Einsteina. Jak już mówiliśmy, teorja względności w pierwszem przybliżeniu daje prawo Newtona; otóż Einstein, posługując się swemi wzorami, zrobił obliczenie dokładniejsze, które okazało, iż charakter pola grawitacyjnego naokoło słońca jest nieco odmienny od tego, jaki przewiduje prawo Newtona, i w tem polu punkt przysłoneczny Merkurego powinien właśnie w przeciągu stulecia obrócić się o 42″,80. Zgodność z obserwacją jest zupełna.

Przy ocenie krytycznej mocy tego argumentu należy mieć na widoku dwie okoliczności. Po pierwsze, każda niemal przyczyna zakłócająca wywoła ruch obrotowy punktu przysłonecznego, wobec czego pole do przypuszczeń jest obszerne; po drugie, zgodność liczbowa traci w dużej mierze na znaczeniu z powodu, iż sama liczba teoretyczna 42″ (ściślej 41″,24 według Newcomba) jest bardzo niepewna. Chodzi tu przecie o ruch niezmiernie powolny, którego wielkość dokładna z trudnością da się wyznaczyć.

Szczególnie ważnym jest dowód na korzyść teorji Einsteina, o którym już mówiliśmy w § 12. W polu grawitacyjnem promień światła zmienia wciąż kierunek biegu, opisując linję krzywą. Widzieliśmy, iż to zakrzywienie pro-

mieni jest minimalne. Dostępnem dla obserwacji może być tylko zakrzywienie promieni, przebiegających tuż około słońca, albowiem wskutek olbrzymich jego rozmiarów podlegają one na dłuższej drodze działaniu potężnego pola grawitacyjnego, panującego w pobliżu powierzchni słonecznej. Na rysunku 12 jest wyobrażony promień niezmiernie oddalonej gwiazdy wysłany w kierunku *GA*. Na swej drodze przebiega on blisko słońca *S*, skutkiem czego ulega zakrzywieniu i do oka obserwatora ziemskiego dąży w kierunku *BZ*, którego przedłużeniem jest *BC*. Wydaje się obserwatorowi, iż gwiazda znajduje się w kierunku *ZC*, tworzącym kąt *CBG* z kie-



Rys. 12.

runkiem równoległym do *GA*, w którym gwiazda byłaby widoczna, gdyby promienie jej nie ulegały odchyleniu. Gwiazda zatem oddala się nieco od słońca na powierzchni kuli niebieskiej, gdzie dla nas znajdują się pozornie wszystkie ciała niebieskie. Rachunek daje na kąt *CBG* wartość wynoszącą 1″,75: ta wielkość jest niedaleko granicy, której sięga dokładność stosowanych tu pomiarów astronomicznych.

Zauważyć wypada, iż przy obliczaniu odchylenia trzeba posługiwać się ogólnemi wzorami teorji i byłoby błędem sądzić, iż odchylenie ma być takie, jak gdyby promień spadał ku powierzchni słońca w jego polu grawitacyjnem. W tym ostatnim przypadku droga promienia byłaby identyczną z dro-

gą pocisku, ulegającego przyciąganiu według prawa Newtona i odchylenie wynosiłoby dokładnie połowę poprzednio podanej wartości, t. j. 0″,87. Tę liczbę nazwiemy Newtonowską.

Z powyższych objaśnień wypływa, iż tylko gwiazdy widoczne na kuli niebieskiej tuż około słońca będą miały wskutek odchylenia ich promieni położenie nieco zmienione względem gwiazd dalej od słońca położonych. Słońce w ciągu roku wędruje pozornie po sklepieniu niebios; porównywując przeto wzajemne położenie gwiazd pewnej grupy w chwili, gdy słońce śród nich się znajdowało, z rozmieszczeniem tychże gwiazd, po oddaleniu się od nich słońca, możemy zauważyć i wymierzyć zmianę położenia oraz kąt odchylenia, o który chodzi. Najlepiej w tym celu robić fotografje słońca i otaczających je gwiazd. Jasną jest rzeczą, iż na przeszkodzie stoi oślepiający blask słońca: obserwacje te są więc możliwe tylko podczas całkowitych zaćmień słonecznych.

Był zamiar zapoczątkować je w sierpniu 1914 r., gdy zaćmienie było widoczne w Rosji, ale wówczas wybuch wojny europejskiej stanął na przeszkodzie. Nowa sposobność nadarzyła się 29 maja 1919 r. i wykorzystali ją anglicy, którzy zorganizowali dwie wyprawy w celu wykrycia zjawiska Einsteina: jedną do miejscowości Sobral w Brazylji, drugą — na wyspę Książęcą u wybrzeży Kamerunu w Afryce Zachodniej. Kierownikiem tej drugiej wyprawy był prof. Eddington, żarliwy propagator idej Einsteina w Anglji. Obu wyprawom powiodło się swego celu dopiąć.

Otrzymano trzy serje zdjęć: jedną na wyspie Książęcej, dwie — w Sobralu, wszystkie z pomocą różnych instrumentów. Średnia wartość odchylenia promienia, przebiegającego tuż około brzegu słońca, wyprowadzona ze zdjęć na wyspie Książęcej, wynosi 1″,61, co nie różni się znacznie od liczby Einsteina. Pierwsza serja zdjęć w Sobralu dała wartość odchylenia zgodną z liczbą, którą nazwaliśmy Newtonowską.

Druga serja zdjęć w Sobralu znów okazała się w zgodzie z Einsteinem, dając średnią wartość równą 1",98. Uznano, iż świadectwo tej serji zdjęć, która nie potwierdziła teorji Einsteina wzbudza mniejsze zaufanie, ponieważ obrazy gwiazd na płytach fotograficznych nie były dość wyraźne wskutek działania promieni słonecznych na zwierciadło celostatu. Za najbardziej udatną poczytują serję trzecią.

Widzimy zatem, że wyniki obserwacyj są naogół dla Einsteina pomyślne. Dodatkowe potwierdzenie można upatrywać w tem, że wielkość odchylenia zmniejsza się w miarę oddalania się od brzegu słońca mniej więcej w stopniu przewidzianym przez teorję Einsteina. Trudno jednak uważać, aby te obserwacje rozstrzygnęły kwestję w sposób decydujący.

Z tem większem zainteresowaniem należy oczekiwać nowych obserwacyj; tu przychodzi z pomocą szczęśliwy zbieg okoliczności. Powodzenie pomiarów dużo zależy od warunku, ażeby słońce w czasie zaćmienia znajdowało się w okolicy nieba, bogatej w gwiazdy. Podczas zaćmienia 1919 r. warunki były wyjątkowo pomyślne. Otóż sposobność niemniej szczęśliwa powtórzy się w r. 1938. Potem, być może, setki lat miną, nim znów się zdarzą te pomyślne zaćmienia.

Trzeciego dowodu, potwierdzającego teorję względności, może dostarczyć przewidziane przez nią przesunięcie linij widmowych. Według teorji zegar ma chód powolniejszy, jeżeli jest ustawiony w pobliżu wielkich mas przyciągających. Doskonałemi zegarami są atomy pierwiastków chemicznych: promieniowanie ich daje widmo, składające się z oddzielnych linij; każdej z nich odpowiada drganie atomowe mające oznaczony okres. Atom jakiegokolwiek pierwiastka drgający na słońcu powinien mieć okres drgania nieco dłuższy, aniżeli atom tegoż pierwiastka drgający w ziemskiem źródle światła. To uwidoczni się w przesunięciu linij wid-

mowych słonecznych względem linij ziemskich ku czerwonej części widma. Przesunięcie jest niezmiernie małe, ale mierzalne dzięki nadzwyczajnej dokładności pomiarów w tej dziedzinie fizyki.

Nie można, niestety, zbyt wiele oczekiwać od tej metody. Warunki na słońcu są tak skomplikowane i odmienne od ziemskich, że trudno oddzielić wpływ innych czynników, powodujących przesunięcie, od działania grawitacji. W rzeczy samej wyniki dotychczasowych dość licznych pomiarów były sprzeczne.

Nadmienię jednak, że najświeższe pomiary, dokonane przez uczonych francuskich (Pérot, Buisson et Fabry) wykazują zgodność z przewidywaniem Einsteina.

§ 17. Uwagi krytyczne i zakończenie.

W swoim wykładzie, nie przerywanym żadnemi uwagami krytycznemi, starałem się w miarę sił uwydatnić tę wewnętrzną siłę przekonywającą, jaką, zgodnie ze słuszną opinją Lauego, teorja względności posiada. Jest ona potężnym wytworem myśli badawczej i nie można zaprzeczyć temu, iż nosi na sobie znamię wielkości. Jednakże wzbudziła ona z wielu stron energiczne protesty, czasem namiętne w tonie. Zwolennicy teorji najczęściej nie znajdują w niej żadnych wad i trudności, opatrując zarazem stare poglądy na przestrzeń i czas epitetami takiemi, jak „bezsensowny" i t. p.

Sądzę, iż minał czas, gdy teorja Einsteina dopiero zdobywała sobie uznanie. Niema powodu zamilczać jej słabe strony. Jeśli jest doskonała, pozostaje ją tylko podziwiać; stanowisko krytyczne może dać pobudkę do dalszych badań, prowadzących do rozwoju i sprawdzenia samej teorji. Dogmatyzm w nauce zawsze jest szkodliwy i zbędny.

Przypatrzmy się więc nieco mocy tych podstaw ideowych, na których teorja względności jest zbudowana. Najpierw jest rzeczą interesującą poznać stanowisko samego Einsteina. Będzie to równocześnie ciekawy przyczynek do psychologji twórczości naukowej. Wielu z pośród twórców nauki zdawało sobie wyraźnie sprawę z trudności połączonych z wygłaszanemi przez nich twierdzeniami. W pierwszym rzędzie należał do nich Newton: zasady i prawa przez niego odkryte zostały zdogmatyzowane dopiero przez jego następców.

Einstein, jak się zdaje, jest bezwzględnie przekonany o słuszności tego sposobu widzenia rzeczy, któremu daje wyraz teorja względności. To wrażenie odnosi się z czytania jego pism, zresztą nader zwięźle redagowanych. Charakterystyczną jest pod tym względem rozmowa z Einsteinem przytoczona w książce Moszkowskiego pod tytułem „Einstein“[1]). Zapytany, czy odczuwał żywą emocję, gdy obliczał drogę Merkurego i zdobył wynik, że wielkość ruchu punktu przysłonecznego jest w zgodzie z liczbą, podaną przez astronomów, odpowiedział Einstein: „ani na jedną sekundę nie wątpiłem, że rezultat rachunku będzie zgodny z obserwacjami. Wogóle—dodał—próżną rzeczą jest sprzeciwiać się oczywistości“. W swej książce popularnej o teorji względności, mówiąc o przesunięciu linij widmowych ku czerwieni, robi Einstein na końcu uwagę: „nie wątpię, że także i ta konsekwencja teorji znajdzie rychło potwierdzenie“.

Skąd wynika ta pewność? Źródła jej nie są czysto fizyczne, albowiem dla fizyka niewątpliwemi są tylko fakty doświadczenia i twierdzenia zapożyczone z matematyki. Konstrukcja teoretyczna nabiera cech pewności dopiero dzięki potwierdzeniu doświadczalnemu. Dla Einsteina zasadniczy

---

[1]) Einstein: Einblicke in seine Gedankenwelt, Berlin 1921—1922, p. 18.

postulat teorji względności jest niezbity sam przez się, niezależnie od doświadczenia. Pewność ma tu, oczywiście, charakter filozoficzny, ściślej, epistemologiczny.

Po przytoczeniu wyżej (§ 14) wzmiankowanego przykładu dwu ciał, znajdujących się w ruchu obrotowym względem siebie, i wskazaniu, że mechanika klasyczna wprowadza tutaj przyczynę fikcyjną, Einstein konkluduje: „z pośród wszystkich, w dowolny sposób poruszających się układów odniesienia żaden nie może być uprzywilejowany, jeżeli się chce uniknąć podniesionego zarzutu epistemologicznego. Prawa fizyki muszą być tak zbudowane, że zachowują ważność dla wszystkich układów spółrzędnych".

Nie każdy zapewne podzieli stanowisko Einsteina, chociaż jest zrozumiałą wiara twórcy w swoje dzieło. Powoływanie się w nauce o przyrodzie ma konieczność pewnych pojęć jest zwodnicze. Wystarczy przypomnieć, że powszechnie uważano jeszcze przed 30 laty prawa mechaniki Newtona za niewzruszone. Kant w jednem ze swych pism doby krytycznej wypowiedział zdanie, że wielkie dzieło Newtona „Philosophiae naturalis Principia mathematica" jest niezmiennym kodeksem „prawdy" fizycznej.

Że doktryna względności nie jest tak bezsporna nawet w oczach jej zwolenników, wskazuje fakt, iż śród najwybitniejszych relatywistów panuje różnica poglądów w stosunku do kwestyj bardzo istotnych.

Już zauważyliśmy, iż Laue faktycznie nie chce zgodzić się na całkowite równouprawnienie Kopernika z Ptolemeuszem. Eddington wbrew duchowi teorji względności utrzymuje, iż jest nie do pomyślenia, ażeby usunięcie ciał niebieskich mogło zakłócić busolę girostatyczną. Przez tę nazwę rozumiemy ciało stałe wprawione w nader szybki ruch wirowy około osi symetrji (ogólniej rzecz biorąc, około wielkiej lub małej osi bezwładności). Oś obrotu wskutek

działania sił odśrodkowych zachowuje w przestrzeni (ściślej, w układzie astronomicznym) stały kierunek. Zgodnie z teorją względności możemy wprowadzić układ odniesienia spoczywający względem ciała, to znaczy wraz z niem wirujący. Postulat równoważności poucza, iż wolno z jednakowem prawem uważać siły odśrodkowe jako wywołane, albo ruchem obrotowym ciała względem ciał niebieskich, albo obrotem wszystkich ciał niebieskich dokoła ciała. Te siły musiałyby zniknąć, gdyby ciał niebieskich nie było. Temu zaprzecza Eddington.

Prof. Mie, znany badacz na polu zagadnień związanych z teorją względności, nie uznaje tożsamości natury wszystkich pól grawitacyjnych i dzieli je na pozorne, wywołane ruchem przyśpieszonym układów odniesienia, oraz rzeczywiste, które wytwarza materja. Realność przypisuje Mie tylko tym ostatnim. Posługiwaliśmy się też dla jasności wykładu terminami „pozorny" i „rzeczywisty", mówiąc o polach grawitacyjnych, ale zaznaczyliśmy później (§ 14), iż Einstein nie upatruje zasadniczej różnicy między obu rodzajami pól.

Najbardziej radykalne tendencje śród relatywistów reprezentuje Weyl, autor najgruntowniejszego pod względem matematycznym dzieła o teorji względności pod tytułem: „Raum, Zeit und Materie".

Weyl usiłuje posunąć względność daleko poza granice nakreślone przez Einsteina, przeprowadzając pogląd, iż pole elektromagnetyczne tak samo, jak grawitacyjne, sprowadza się do własności geometrycznych rozciągłości przestrzenno-czasowej. Miary przestrzeni i czasu w tej rozciągłości Weyla zatracają jeszcze bardziej podobieństwo do naszych zwykłych miar, które określamy na gruncie geometrji euklidesowej.

W ten sposób byłaby osiągnięta radykalna geometryzacja fizyki, wyeliminowanie niemal doszczętne substancjalności z pojęć o świecie fizycznym.

Einstein stanowczo przeciwstawił się temu dążeniu Weyla. Różnica zdań między Einsteinem, Mie i Weylem ujawniła się w dyskusji na 86-tym Zjeździe przyrodników i lekarzy niemieckich w Nauheimie (r. 1920).

Teraz wytoczymy argument, przemawiający za tem, że teorja względności i jej podstawowy postulat o równoważności dowolnych układów odniesienia nie da się przeprowadzić bez ograniczeń. Śród wszystkich możliwych układów spółrzędnych Gaussa istnieją takie, względem których bieg czasu jest odwrócony. Zatem w polu grawitacyjnem, odpowiadającem tym spółrzędnym, skutek nastąpi wcześniej, aniżeli przyczyna. Dziś coś się zdarzy, a przyczyna będzie dopiero jutro.

Weyl nie cofa się zresztą przed tą konsekwencją. Na stronicy 220 trzeciego wydania cytowanego wyżej dzieła mówi on: „zasadniczo może więc stać się, że ja teraz przeżywam zdarzenia, które częściowo są skutkiem moich przyszłych postanowień i działań" (es kann also principiell geschehen dass ich jetzt Ereignisse mit erlebe die zum Teil erst eine Wirkung meiner künftigen Entschlüsse und Handlungen sind). Ustęp ten polecam do zgłębienia tym, którzy twierdzą, że teorja względności rozstrzygnęła wszystkie trudności tkwiące w pojęciach przestrzeni i czasu.

Większość [czytelników, prawdopodobnie, przyzna, iż na tych zawrotnych wyżynach abstrakcji brak już powietrza i człowiekowi grozi uduszenie.

Odrzucając możliwość przytoczonego wniosku, zmuszeni jesteśmy zgodzić się na ograniczenie postulatu względności. Hilbert w swych wykładach o podstawach fizyki wskazał, iż potencjały grawitacyjne powinny spełniać pięć warunków, ażeby stosunek czasowy między przyczyną i skutkiem został zachowany. Te warunki, mające postać nierówności, wyznaczają dopuszczalne z punktu widzenia fizycznego układy odniesienia.

Otóż ograniczenia omawiane nie wynikają z podstaw logicznych teorji względności. Nieuchronnym przeto wydaje się wniosek, iż przyroda jednak nie wytrzymuje bezwzględnej względności; zatem względność przestrzeni i czasu nie jest zupełna i w tych wyobrażeniach tkwi jakaś treść bezwzględna. W związku z tem wzbudza wątpliwości zatarcie różnicy między przestrzenią i czasem we wzorach zasadniczych fizyki.

Uważny czytelnik już dawno musiał spostrzec, iż w rozumowaniach teorji względności przewijają się wciąż pojęcia, określane wyrazami „rzeczywistość" i „pozór". Mówiliśmy, że narzucające się nam intuicyjnie pojęcie jednoczesności jest pozorem, eter — niema cech rzeczywistości fizycznej; używaliśmy terminów „rzeczywisty" i „pozorny" w stosunku do pól grawitacyjnych. Wprawdzie odrzuciliśmy to odróżnienie, starając się iść wiernie śladem myśli Einsteina, ale, jak w tym rozdziale zaznaczono, jeden conajmniej z cieszących się powagą relatywistów je utrzymuje.

Wydaje mi się, że teorja Einsteina nie osiągnęła jasności w pojęciach o tem, co jest rzeczywiste z jej punktu widzenia i jak należy tę rzeczywistość rozumieć. Na dowód przytoczę dwa ustępy z rozpraw Einsteina; o nich zresztą już zrobiliśmy wzmiankę w § 13 i 14.

Mówiąc o tem, że prawa przyrody od wyboru układów odniesienia całkiem nie zależą, wnioskuje Einstein (Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, Annalen der Physik, 49, 1916), że to twierdzenie pozbawia przestrzeń i czas resztek przedmiotowości fizycznej (physikalischer Gegenständlichkeit). Drugi ustęp (patrz koniec § 14) głosi, że obraz fizyczny świata zna dwie pojęciowo zasadniczo odmienne, lubo przyczynowo związane wzajemnie rzeczywistości, eter grawitacyjny i pole elektromagnetyczne, albo przestrzeń i materję (Aether und Relativitätstheorie, Berlin, 1920).

Odnosi się niechybnie wrażenie, że tu Einstein wskrze-

sza do istnienia fizycznego nie tylko eter, lecz i przestrzeń wraz z czasem, który jest nieodłączny od przestrzeni według teorji względności. Eter przytem jest utożsamiony z tą rozciągłością przestrzenno-czasową.

Dwa ustępy zacytowane zawierają treść pojęciowo sprzeczną. Wprawdzie w pierwszym mówi Einstein o przestrzeni i czasie, jako pozbawionych przedmiotowości fizycznej, w drugim, że fizyka zna dwie rzeczywistości, przestrzeń i materję, ale nie znajdujemy wytłumaczenia, jaka jest różnica między przedmiotowością i rzeczywistością fizyczną.

Nie byłoby prawdopodobnie łatwem zadaniem sprecyzować tę różnicę w sposób, któryby zadowolił przyrodnika.

Dalej wątpliwą jest rzeczą, ażeby fizyk, jako badacz przyrody, zdołał łatwo przetrawić i zasymilować tę konsekwencję ostateczną teorji względności, że z każdem zjawiskiem elementarnem są związane cztery liczby, pozbawione określonej treści fizycznej. Taką treść posiada każda wielkość, jeżeli są podane sposoby jej pomiaru. Matematyk nie żąda, aby symbole, któremi on operuje, posiadały jakiekolwiek znaczenie konkretne: jego operacje mają charakter czysto formalny. Fizyk, dążąc do opanowania pojęciowego zjawisk, przeciwnie żąda, ażeby każdy symbol, który występuje we wzorach teoryj fizycznych, posiadał oznaczony odpowiednik w przyrodzie. Tymczasem ogólne wzory teorji względności zawierają symbole, które przyoblekają się w treść fizyczną dopiero po wprowadzeniu pewnych warunków mniej lub więcej dowolnych, nie wynikających w sposób oczywisty z podstaw teorji.

Ta nieokreśloność sprawia, iż, jak wykazuje Painlevé, problem ruchu Merkurego dopuszcza na gruncie teorji względności nie tylko to rozwiązanie, które dał Einstein, lecz nieskończenie wiele innych odmiennych rozwiązań.

Z temi wywodami wiąże się trudność określenia narzę-

dzi mierniczych, bez których fizyka nie da się pomyśleć. Mając na celu wykonanie jakiegokolwiek pomiaru, fizyk wytwarza idealny obraz niezbędnego przyrządu i następnie stara się urzeczywistnić go tak, ażeby jaknajmniej od ideału odbiegał. Stosunki w czterowymiarowej rozciągłości Einsteina są tak skomplikowane, że staje się wątpliwem, czy na gruncie jego teorji będzie możliwe pomyślenie obrazów omawianych.

Przenikliwą analizę teorji względności, opartą na opinji, że ma ona charakter formalny i nieokreślony z punktu widzenia fizycznego, znajdzie czytelnik w pracach prof. Zaremby.

Nie należy zatem zbytnio dziwić się temu, iż niektórzy uważają teorję Einsteina za pewnego rodzaju fantasmagorję matematyczną.

Wysuwając powyżej nagromadzone zastrzeżenia, dalecy jesteśmy od wniosku, iż obalają one teorję względności, w szczególności jej konstrukcję matematyczną. Einstein niewątpliwie wykazał, iż wzory matematyczne, wyrażające ogólne prawa fizyczne, mogą być ukształtowane w postaci „współzmienniczej“ względem układów odniesienia, jeśli użyjemy terminologji matematycznej. Sens fizyczny uzyskanych w ten sposób wzorów jest jednak, jak wskazują rozważania powyższe, dość ciemny.

Zagorzali zwolennicy poglądów Einsteina stawiają go na równi z Newtonem, twierdząc, iż na gruncie teorji względności została dokonana przebudowa fizyki, która ma teraz wytkniętą drogę do dalszego rozwoju. Sąd ostateczny wyda w tej sprawie oczywiście historja. Są jednakowoż pewne wątpliwości, o których wypada powiedzieć słów kilka dla wytworzenia obrazu zupełnego tych walk, jakie się toczą obecnie w dziedzinie myśli fizycznej.

Jak już zaznaczyliśmy w § 2, w ciągu dwustu lat od chwili ukazania się Principi'ów Newtona nie było poważnych

podstaw do wątpienia, czy prawa Newtona są wystarczające do opisu zjawisk materjalnych. Jeden z największych fizyków drugiej połowy wieku XIX, lord Kelvin, który zmarł w r. 1907, do końca życia usiłował wytworzyć syntezę fizyki na gruncie mechaniki Newtonowskiej.

Teorja względności także okazuje uniwersalne dążności. Jednak już na początku swego rozwoju stoi ona w obliczu zagadnień, przed któremi jest tak samo bezsilna, jak mechanika klasyczna. Mam na myśli teorję kwantów, która, opierając się na szeregu faktów z dziedziny promieniowania, nauki o cieple i t. d., upatruje w przyrodzie istnienie jakby swoistego wyboru, nieciągłości, nie znajdującej usprawiedliwienia ani w mechanice klasycznej, ani w teorji względności. Pomimo tej zagadkowości można uważać pojęcie kwantów za utrwalone w fizyce spółczesnej.

Od początku bieżącego stulecia badania fizyczne są skierowane w pierwszym rzędzie ku wyświetleniu budowy materji. Panujący pogląd streszcza się w twierdzeniu, że atomy materji są zbudowane z elektronów, cząstek elementarnych, mających nabój elektryczny, dodatni albo ujemny. Łączono nadzieję z teorją grawitacji Einsteina, iż zdoła rzucić światło na niektóre zagadnienia z tej dziedziny.

Mniemano, iż z pomocą pól grawitacyjnego i elektromagnetycznego uda się niejako zbudować elektrony, a zatem i cząsteczki ciał przyrody. Te nadzieje nie znalazły dotychczas urzeczywistnienia i nawet Weyl niedawno wyznał, że na gruncie teorji pól fizycznych zagadnienie materji nie da się rozwiązać.

Wydaje się zresztą à priori oczywistem, że, posługując się pojęciami geometrycznemi, nie potrafimy nigdy zdać sprawy z różnorodności pierwiastków chemicznych: przecież twory geometryczne składają się z elementów identycznych.

Przesilenie, jakie przeżywa fizyka w dobie obecnej, nie

zakończy się, prawdopodobnie, tak prędko. W miarę tego, jak rosną zdobycze nauki, rozszerzają się granice, na których myśl badawcza styka się z nieznanem.

Powtórzymy na zakończenie słowa, wyrzeczone przez Newtona:

„Nie wiem, kim ja się wydaję ludziom, w moich oczach jestem tylko dzieckiem, które bawi się na brzegu morskim, ciesząc się tem, że od czasu do czasu znajduję łepiej wygładzony kamyczek lub muszlę ładniejszą, niż zazwyczaj, podczas, gdy wielki ocean prawdy pozostaje wciąż przedemną niezbadany."

7—IV—1922.

Warszawa.
